

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Doria Marciuš

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Đukić, mag. ing. aero. ing.

Studentica:

Doria Marciuš

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Ankici Đukić na stručnoj pomoći, razumijevanju i strpljenju u izradi ovoga rada.

Doria Marciuš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Urbroj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Doria Marcioš** Mat. br.: 0035191029

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA EKSPERIMENTALNO DOBIVENIH REZULTATA RADA SUNČANE ELEKTRANE SNAGE 960 W**
Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF ACHIEVED OPERATING EXPERIMENTAL DATA OF 960 W SOLAR POWER PLANT**
Opis zadatka:

Više od 120 zemalja potpisalo je 22. travnja 2016. godine u New York-u klimatski sporazum dogovoren u prosincu 2015. godine u Parizu. Prema njemu, međunarodna skupina stručnjaka za klimu treba izraditi specijalno izvješće do 2018. godine o načinima postizanja $1,5^{\circ}\text{C}$ i o učincima tog zagrijavanja. Već sada je prijedeno 400 ppm CO_2 , a 500-550 ppm CO_2 smatra se kao *Point of no return*. Ključ je dakle prijeći na tehnologije koje ne emitiraju CO_2 , odnosno na obnovljive izvore energije. Ipravo s tim ciljem, na krovu Laboratorija za energetska postrojenja instalirana je Sunčana elektrana snage 960 W gdje se dobivena električna energija koristi za proces dobivanja vodika elektrolizom vode, odnosno za pohranu energije. Rad Sunčane elektrane prati se preko web sučelja s trajnom pohranom izmjerenih podataka.

U okviru rada potrebno je:

1. Dati tehnički opis Sunčane elektrane,
2. Na temelju prikupljenih eksperimentalnih podataka usporediti proizvedenu energiju FN modula na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču,
3. Eksperimentalno dobivene rezultate usporediti s rezultatima dobivenih preko jednog od javno dostupnih servisa izračuna koji se koriste pri projektiranju Sunčanih elektrana.

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadetak zuda:

Ankica Đukić

Doc. dr. sc. Ankica Đukić, mag.ing.aero.ing.

Predsjednik Povjerenstva:

Igor Balen

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SUNCE KAO IZVOR ENERGIJE	2
2.1. Značajke Sunca	2
2.1.1. Uloga	2
2.1.2. Sunčeva svjetlost	3
2.1.3. Sunčeva konstanta	3
2.1.4. Snaga	3
2.2. Sunčevo ozračenje	4
2.2.1. Ozračenje u atmosferi	4
2.2.2. Raspršenje ozračenja	5
2.2.3. Bilanca ozračenja u sustavu Zemlja-atmosfera	5
2.2.4. Kut upada Sunčevih zraka	8
2.3. Sunčev potencijal područja	11
2.3.1. Energija Sunca u svijetu	11
2.3.2. Sunčeva energija u Hrvatskoj	13
3. FOTONAPONSKI (FN) SUSTAVI	18
3.1.1. Princip rada FN članaka	20
3.1.2. Vrste FN članaka	22
3.1.3. Nadomjesna shema FN članka i U-I karakteristika	26
3.1.4. Spajanje FN modula u serije i paralele	31
4. TEHNIČKI OPIS SUNČANE ELEKTRANE	33
4.1. FN moduli	35
4.1.1. FN moduli na fiksnom nosaču	35

4.1.2. FN moduli na jednoosnom nosaču	38
4.1.3. FN moduli na dvoosnom nosaču	40
4.2. Ostali uređaji Sunčane elektrane	42
5. USPOREDBA PROIZVEDENE ENERGIJE FN MODULA NA FIKSNOM, JEDNOOSNOM I DVOOSNOM NOSAČU	45
5.1. Sunčana elektrana.....	45
5.2. Usporedba FN modula	48
5.2.1. Godišnja proizvodnja energije FN modula	48
5.2.2. Mjesečna proizvodnja energije FN modula	49
5.2.2.1. Proizvodnja energije tijekom proljeća (21. ožujka 2016. - 21. lipnja 2016 godine.)	51
5.2.3. Tjedna proizvodnja energije FN modula.....	52
6. USPOREDBA EKSPERIMENTALNO DOBIVENIH REZULTATA S REZULTATIMA JAVNO DOSTUPNOG SERVISA PVGIS	56
6.1. Opis PVGIS-a.....	56
6.2. Analiza rezultata PVGIS-a	57
7. ZAKLJUČAK	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Godišnje rezerve Sunčeve energije na Zemlji [26].....	2
Slika 2.	Ozračenje u slojevima atmosfere [6]	4
Slika 3.	Bilanca ozračenja u sustavu Zemlja-atmosfera [6]	6
Slika 4.	Ozračenje Sunca i Zemlje u ovisnosti o valnoj duljini (gore), te apsorpcijske značajke atmosferskih sastojaka (dolje) [6]	7
Slika 5.	Prikaz smanjenja intenziteta zračenja [7].....	8
Slika 6.	Sezonska promjena položaja Sunca [7]	9
Slika 7.	Dnevni hod Sunca [7]	9
Slika 8.	Utjecaj sferičnog oblika Zemlje na dozračenu energiju [7]	10
Slika 9.	Sunčeva energija po regijama [9].....	11
Slika 10.	Srednja godišnja ozračenost svijeta na horizontalnu plohu [10].....	12
Slika 11.	Godišnja ozračenost Europe na horizontalnoj plohi [16].....	13
Slika 12.	Dinamika rasta korištenja Sunčeve energije u Hrvatskoj do 2030. godine [13]....	15
Slika 13.	Odnos broja postrojenja i ukupne električne snage postrojenja po vrstama postrojenja [16]	16
Slika 14.	Godišnja ozračenost Hrvatske na horizontalnu plohu [15].....	17
Slika 15.	Spajanje FN članaka [28].....	18
Slika 16.	Podjela FN sustava.....	18
Slika 17.	<i>Pozdrav Suncu</i> u Zadru kao primjer samostalnog FN sustava [27].....	19
Slika 18.	FN sustav spojen na mrežu [28].....	19
Slika 19.	Princip rada FN članka [1]	21
Slika 20.	Fotoelektrični učinak FN članka [25]	21
Slika 21.	Teorijski maksimum učinkovitosti FN članaka pri standardnim uvjetima, ovisno o vrsti članka i energiji praga [24]	22
Slika 22.	Monokristalni, polikristalni i amorfni FN članci [24].....	23
Slika 23.	Prikaz poluvodičkih materijala korištenih za izradu FN članaka koji koriste različite dijelove spektra Sunčevog ozračenja [7]	23
Slika 24.	Vremenski razvoj učinkovitosti pretvorbe energije sunčanih FN članaka [19].....	24
Slika 25.	FN članak izrađen tehnologijom tankog filma [29]	25

Slika 26.	Nadomjesna shema FN članka [24].	26
Slika 27.	Utjecaj serijskog i paralelnog otpora na U-I karakteristiku	26
Slika 28.	U-I karakteristika osvijetljene i neosvijetljene FN članke [24]	27
Slika 29.	U-I karakteristika idealne i realne osvijetljene FN članke [24]	28
Slika 30.	U-I karakteristika monokristalnog FN članka pri ozračenjima od 200, 600 i 1000 W/m ² [26]	29
Slika 31.	Ovisnost U-I karakteristike o temperaturi [26]	30
Slika 32.	Linearna i standardna garancija na 25 godina za FN modula [21]	30
Slika 33.	Spajanje FN modula u paralelu [28]	31
Slika 34.	Spajanje FN modula u seriju [28]	32
Slika 35.	FN moduli na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču na krovu Laboratorija za energetska postrojenja	33
Slika 36.	Unutarnja upravljačka jedinica Sunčane elektrane	34
Slika 37.	FN moduli na fiksnom nosaču	36
Slika 38.	Suntech deklaracija FN modula	37
Slika 39.	FN moduli na jednoosnom nosaču	38
Slika 40.	Značajke SATControl (Hour single axis motor) elektromotora jednoosnog nosača	39
Slika 41.	Upravljačka jedinica jednoosnog nosača	39
Slika 42.	FN moduli na dvoosnom nosaču	40
Slika 43.	Upravljačka jedinica FN modula na dvoosnom nosaču	41
Slika 44.	Značajke SATControl (<i>Elevation angle axis motor</i>) elektromotora FN modula na dvoosnom nosaču	41
Slika 45.	Mikropretvarači i ormar s osiguračima	42
Slika 46.	Ormar s osiguračima	43
Slika 47.	Komunikacijski uređaj Enphase Gateway	43
Slika 48.	Razvodni ormar AC	44
Slika 49.	Meteorološka stanica s osjetnikom	44
Slika 50.	Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije na web sučelju	45
Slika 51.	Udio proizvedene energije različitih FN panela unutar razdoblja od jedne godine	46
Slika 52.	Mjesečna proizvodnja energije Sunčane elektrane u kWh	46
Slika 53.	Dijagram ukupne proizvodnje energije s web sučelja EnlightenManager	47

Slika 54.	Usporedba ukupno dobivene energije.....	47
Slika 55.	Usporedba proizvodnje svakog FN modula u kWh na godišnjoj razini	48
Slika 56.	Usporedba proizvodnje svakog FN panela u kWh na godišnjoj razini.....	49
Slika 57.	Usporedba udjela proizvedene energije FN panela po godišnjim dobima.....	50
Slika 58.	Usporedba proizvedene energije FN panela po godišnjim dobima	50
Slika 59.	Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije na web sučelju tijekom proljeća 51	
Slika 60.	Dijagram ukupne proizvodnje energije tijekom proljeća s web sučelja	51
Slika 61.	Dijagram proizvodnje energije svakog FN panela tijekom proljeća	52
Slika 62.	Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije u najproduktivnijem (gore) i najneproduktivnijem (dolje) tjednu	52
Slika 63.	Iznos proizvedene energije svakog FN modula u najproduktivnijem tjednu.....	53
Slika 64.	Iznos proizvedene energije svakog FN modula u najneproduktivnijem tjednu.....	53
Slika 65.	Aktivna snaga svih FN panela najproduktivnijeg tjedna	54
Slika 66.	Aktivna snaga svih FN panela najneproduktivnijeg tjedna	54
Slika 67.	Aktivna snaga svih FN panela dana 25. kolovoza 2016. (gore) i 14. veljače 2016. (dolje) 55	
Slika 68.	Geografska lokacija Sunčeve elektrane	57
Slika 69.	Ulazni parametri u PVGIS servisu za FN module na fiksnom nosaču	58
Slika 70.	Promjena optimalnog kuta nagiba FN modula na fiksnom nosaču tijekom godine 58	
Slika 71.	Usporedba mjesečne proizvedene energije FN panela prema PVGIS-u.....	60
Slika 72.	Udio godišnje proizvedene energije FN modula na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču	61
Slika 73.	Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na jednoosnom nosaču	62
Slika 74.	Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na fiksnom nosaču.....	62
Slika 75.	Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na dvoosnom nosaču	62

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Ukupna snaga FN elektrana (W/stan) [12].....	14
Tablica 2.	Raspoloživost Sunčevog potencijala za grad Zagreb [21]	35
Tablica 3.	Značajke FN modula STP160S-24/Ac pri standardnim uvjetima ($T_c = 25\text{ °C}$, $E = 1000\text{ W/m}^2$)	37
Tablica 4.	Dobiveni podaci osunčanja kod FN panela prema PVGIS-u	59
Tablica 5.	Dobiveni podaci proizvedene energije FN panela prema PVGIS-u	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	m	Valna duljina
c	m/s	Brzina svjetlosti
k	J/K	Boltzmannova konstanta
T	K	Temperatura
h	Js	Planckova konstanta
E	J	Energija
E_k	J	Kinetička energija
W_i	J	Izlazni rad
I_s	A	Struja fotonapona
I_{ks}	A	Struja kratkog spoja
I_0	A	Struja zasićenja
I_d	A	Struja diode
U_{ok}	U	Napon otvorenog kruga
U_m	U	Optimalan napon
I_m	U	Optimalna struja
P_m	W	Maksimalna snaga
P	W	Snaga
e	eV	Elementarni naboj
R_p	Ω	Paralelni otpor
R_s	Ω	Serijski otpor
F	%	Faktor punjenja
η	%	Učinkovitost
j_{ks}	A/m ²	Gustoća struje kratkog spoja

SAŽETAK

Istraživanjem i izgradnjom sve više energetske postrojenja koja koriste Sunčevu energiju kao obnovljivi izvor energije, svijet se približava globalnom cilju smanjenja stakleničkih plinova, a time i boljoj kvaliteti života na zemlji. U tu svrhu, ovaj rad daje tehnički opis Sunčane elektrane od 960 W na krovu Laboratorija za energetska postrojenja FSB-a, koja se sastoji od fotonaponskih (FN) modula na fiksnoj, jednoosnoj i dvoosnoj nosači. Pomoću eksperimentalno dobivenih rezultata, uspoređuju se i analiziraju navedeni moduli. Zatim preko jednog od javno dostupnih servisa izračuna, koji se koriste pri projektiranju Sunčanih elektrana, dobivaju se rezultati potrebni za usporedbu s prethodnim rezultatima mjerenja. Na temelju računalne simulacije i eksperimentalne metode prikupljanja podataka, provedena je energetska i tehnološka analiza proizvodnje energije instalirane Sunčane elektrane.

Ključne riječi: Sunčana elektrana, fotonaponski moduli, fiksni, jednoosni i dvoosni nosač, proizvedena energija

SUMMARY

With research and the construction of more power plants that use solar energy as a renewable energy source, it is approaching the global aim of reducing greenhouse gas emissions, and thus a better quality of life on the earth. For that purpose, this work provides a technical description of solar power plant of 960 W that is located on the roof of the Laboratory for Energy of FSB, and consisting of photovoltaic modules on a fixed, single axis and dual axis solar tracker. Using experimentally obtained results, listed modules are compared and analyzed. Next, via one of the public available services of calculation, which is used in the construction of solar power plants, there are got the results needed for comparison with the previous experimental results. In the end is given energy and technological analysis of production of solar power plant, based on software simulation and experimental methods of data collection.

Key words: Solar power plant, photovoltaic modules, fixed, single axis dual axis solar tracker, produced energy

1. UVOD

Brojna ispitivanja u različitim područjima znanosti ukazuju na ozbiljne probleme današnjice izazvane emisijom ugljikovog dioksida (CO_2) te je tako je došlo do podizanja svijesti ljudi prema važnosti obnovljivih izvora energije, a time i izgradnje novih energetskih postrojenja koja koriste te resurse.

Neke od obnovljivih izvora energije kao što su Sunčeva energija i energija vjetra nije moguće pohraniti niti transportirati u izvornom obliku, dok se s druge strane voda u vodotocima može akumulirati, a biomasa se može djelomično pretvoriti u bioplin. Izvore energije koje nije moguće pohraniti treba iskoristiti u trenutku kada se pojave ili ih pretvoriti u neki drugi oblik energije.

Sunčeva energija se najčešće pretvara u električnu pa se tako može koristiti na lokalnoj razini ili nižoj jedinici još bliže potrošnji kao što su to primjerice vlastite kuće čime se dugoročno gledajući smanjuje trošak pojedinca te snižava prosječno opterećenje električnih mreža. Upravo zbog tog razloga postoji sve veća potražnja za ugradnjom sunčanih panela na krovove kuća toplijih područja iako je početni trošak još uvijek poprilično velik.

Kako bi pridonijeli u istraživanju tehnologija koje ne emitiraju CO_2 , na krovu Laboratorija za energetska postrojenja FSB-a instalirana je Sunčana elektrana snage 960 W gdje se dobivena električna energija koristi za proces dobivanja vodika elektrolizom vode, odnosno za pohranu energije, a projekt je vodila i realizirala docentica Ankica Đukić, mentorica ovoga rada.

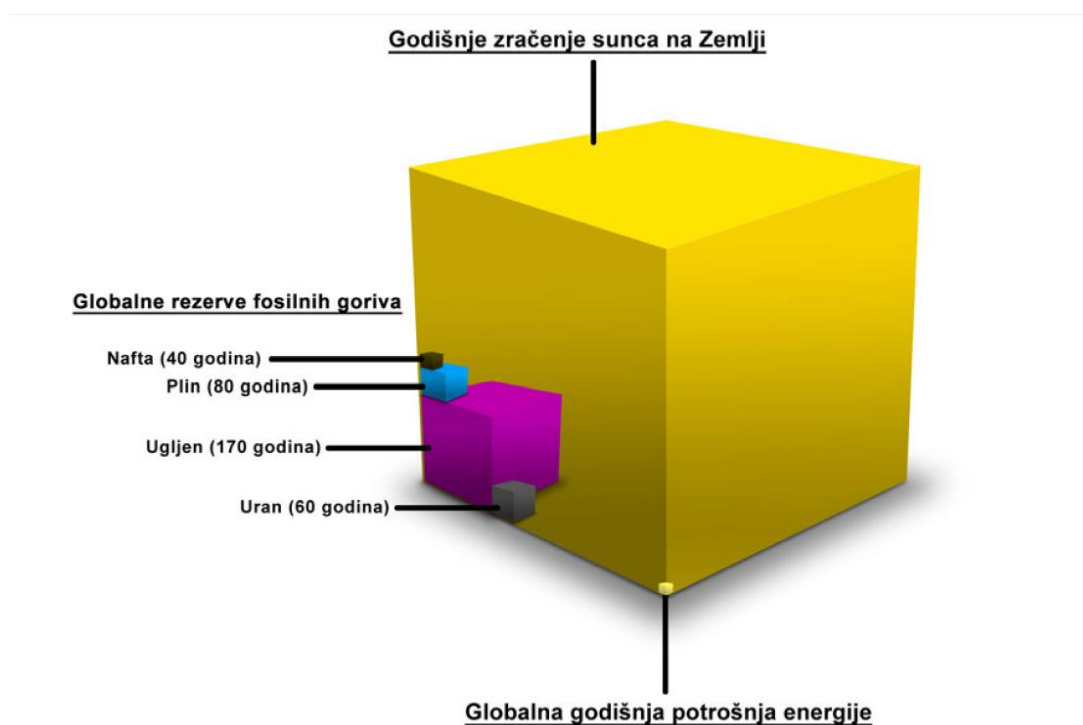
U ovome radu se na temelju prikupljenih eksperimentalnih podataka uspoređuje proizvedena energija FN modula na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču. Tako dobiveni rezultati se zatim uspoređuju s rezultatima dobivenim preko jednog od javno dostupnih servisa izračuna koji se koriste u projektiranju Sunčanih elektrana.

2. SUNCE KAO IZVOR ENERGIJE

2.1. Značajke Sunca

2.1.1. Uloga

Energiju Sunca ljudi koriste od davnih vremena bez ili pomoću različitih tehnologija koje vrlo brzo napreduju. Sunce je nebesko tijelo, zvijezda najbliža Zemlji, bez koje opstanak života na našem planetu nije moguć. Svakodnevno se na različite načine koristi Sunčeva energija pa tako i u najjednostavnijem obliku kao što je primjerice sušenje rublja. Biljke uz pomoć Sunčevog ozračenja proizvode kisik koji se udiše fotosintezom, rastu i na taj način proizvode hranu koju jedu životinje. Bez biljaka i životinja, koje su se prije više stotina milijuna godina raspadale bez prisustva zraka, nastali su nafta, plin i ugljen. Drugim riječima, fosilna goriva koja danas rabimo zapravo predstavljaju davno pohranjenu Sunčevu energiju. Izravno ili neizravno, može se reći da gotovo sva energija koja se iskorištava potječe upravo od Sunca. Količina Sunčeve energije koja dolazi na površinu Zemlje je izuzetno velika, tolika da je u jednoj godini dva puta veća od svih Zemljinih obnovljivih izvora energije [1, 2].



Slika 1. Godišnje rezerve Sunčeve energije na Zemlji [26]

2.1.2. Sunčeva svjetlost

Sunčeva svjetlost je prvenstveni izvor energije za Zemlji. Definira se kao cjelokupni spektar elektromagnetskog ozračenja koje dolazi sa Sunca. Na Zemlji, Sunčeva svjetlost se prigušuje i filtrira kroz Zemljinu atmosferu. Ona je najveća na gornjoj granici atmosfere, a kako se približava tlu slabi zbog upijanja i raspršenja na molekulama plinova i primjesa u atmosferi. Sunčevoj svjetlosti treba 8,3 minute da stigne sa Sunca na Zemlju. Kada direktno Sunčevo zračenje nije prikriveno s oblacima, postoji mješavina blještavog svjetla i toplinskog zračenja, a kada je prekriveno, nastaje raspršeno ili Sunčevo ozračenje [2].

2.1.3. Sunčeva konstanta

Sunčeva konstanta je količina energije dozračene od Sunca na gornjoj granici Zemljine atmosfere koja pada okomito na jediničnu površinu u jedinici vremena pri srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca. Ona uključuje sve vrste elektromagnetskog ozračenja, ne samo vidljivu svjetlost. Sunčeva konstanta je dakle mjera gustoće svjetlosnog toka, dolazećeg Sunčevog elektromagnetskog ozračenja, okomito na ulazne zrake po jedinici površine, na udaljenosti od Sunca do Zemlje. Prosječna vrijednost je $1,368 \text{ kW/m}^2$ i neznatno se mijenja sa Sunčevim ciklusima [3].

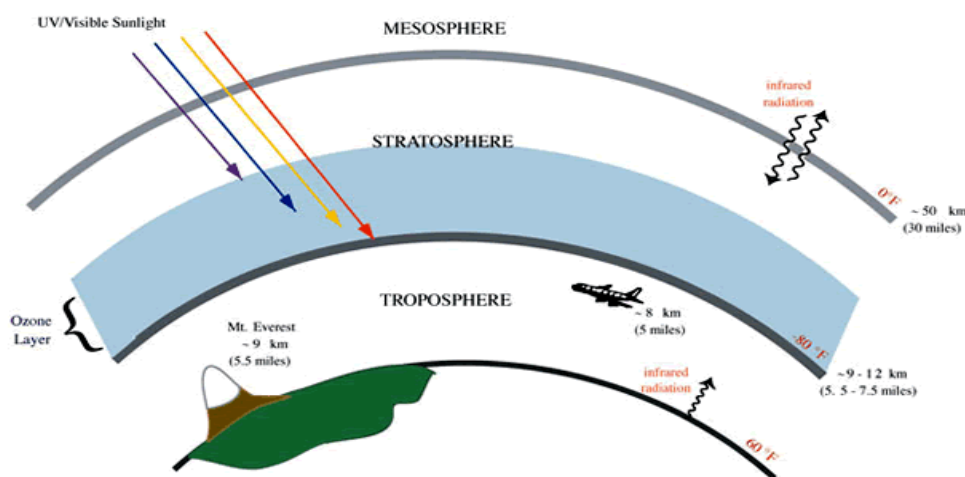
2.1.4. Snaga

Glavni energetske proces koji se odvija na Suncu je nuklearna fuzija, a to je spajanje dva laka atoma u jedan teži uz oslobađanje energije proporcionalne razlici masa prije i nakon reakcije. Nuklearnom fuzijom se svake sekunde u Suncu pretvori oko 700.000.000 tona vodika u oko 695.000.000 tona helija, a razlika od 5.000.000 tona se pretvori po Einstein-ovoj formuli $E = mc^2$ u energiju u obliku gama zračenja. Kada se tih 5.000.000 tona u sekundi pretvori u rad odnosno snagu, dobije se da je snaga Sunca oko $386\,000 \times 10^9 \text{ TW}$. Do granice Zemljine atmosfere dopijeva 170 000 TW, a kako atmosfera reflektira oko 30 % te energije, na Zemlju dolazi 120 000 TW što je 9 000 puta više od proizvodnje primarne energije na Zemlji (13 TW). Za usporedbu, najveća nuklearna elektrana na svijetu je japanska nuklearna elektrana Kashiwazaki koja ima sedam operativnih reaktora i ukupnu snagu od 8.212 MW. Nuklearna elektrana Krško ima snagu na pragu 696 MW. Zemlja u svakom trenutku od Sunca prima 1015 W Sunčevog ozračenja [4].

2.2. Sunčevo ozračenje

2.2.1. Ozračenje u atmosferi

Intenzitet i značajke Sunčevog ozračenja mijenjaju se prolaskom kroz atmosferu, zbog čega na površinu Zemlje dolazi umanjena količina ozračenja. Slabljenje intenziteta ozračenja ovisi o optičkom putu koji zrake prođu do površine Zemlje, a on ovisi o nadmorskoj visini i kutnoj visini Sunca na nebu. Apsorpcija, difuzija i refleksija procesi su koji mijenjaju intenzitet Sunčevog ozračenja, a uslijed njih ozračenje u atmosferi slabi, mijenja smjer i spektralni sastav, te se njegova vrijednost više ne može točno izračunati, već ga je potrebno mjeriti [7]



Slika 2. Ozračenje u slojevima atmosfere [6]

Apsorpcija se uglavnom odvija u višim slojevima atmosfere, gdje dolazi do ionizacije atoma i molekula energijom najkraćih valnih duljina i zagrijavanja toga sloja atmosfere. U nižem sloju ozon i kisik u ozonosferi apsorbiraju ultraljubičasto zračenje i zagrijavaju stratosferu. Troposfera se ne grije izravno od Sunca, već se najvećim dijelom zagrijava od Zemljine površine, apsorpcijom Zemljinog dugovalnog zračenja, te turbulentnim dotokom senzitivne i latentne topline sa Zemljine površine [6].

2.2.2. Raspršenje ozračenja

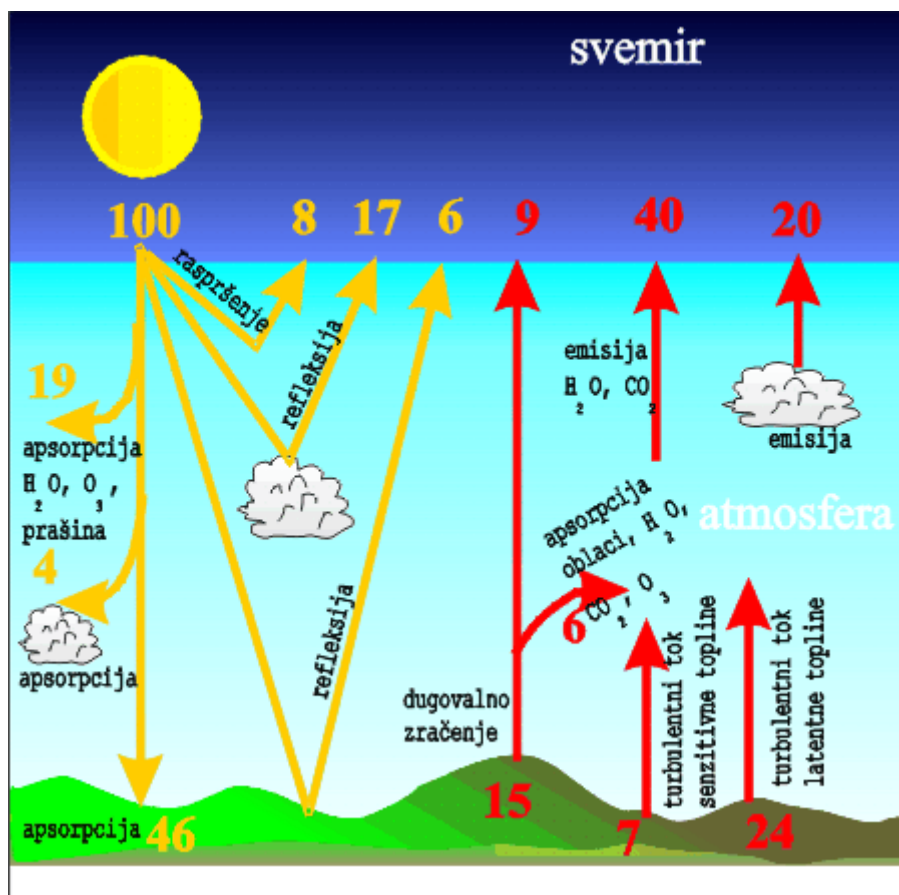
Sunčevo ozračenje u atmosferi se raspršuje u doticaju s molekulama atmosferskih plinova i aerosola. Kada Sunčeva energija na svome putu dopre do molekule plina ili čestice, ta čestica biva pobuđena na titranje, čime i sama postaje sekundarni izvor elektromagnetskog zračenja. Raspršenjem se energija koja dolazi iz jednog smjera reemitira na sve strane, pa se, osim direktne komponente Sunčevog ozračenja (izravno od Sunčevog diska), javlja i difuzna komponenta (zračenje od nebeske hemisfere). Raspršenje ovisi o veličini čestica, pa se tako na sitnom aerosolu i zraku jače raspršuju kratke valne duljine, a od vidljivog zračenja ljubičasti i plavi dio spektra i to obrnuto proporcionalno četvrtoj potenciji valne duljine - Rayleighov zakon (1) [7]:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4} \quad (1)$$

Posljedica toga vidi se sredinom dana kada je Sunce u zenitu (put Sunčevoga ozračenja do tla je kraći), a raspršenje je manje izraženo pa raspršeno ozračenje sadrži više kratkovalnoga zračenja dajući nebu plavu boju. Na krupnijem aerosolu, kapljicama i kristalima raspršenje je gotovo isto za sve valne duljine (obrnuto proporcionalno valnoj duljini), a raspršena svjetlost je bjelkasta. Kako je raspršivanje proporcionalno s četvrtom potencijom valne duljine, ultraljubičaste zrake će se raspršiti znatno više nego zrake bliže crvenom dijelu spektra. Spuštanjem Sunca prema obzoru raspršenje se povećava i time se udio kratkovalnoga ozračenja u ukupnom ozračenju smanjuje. Pri niskim kutevima Sunca, pri izlasku i zalasku, plavi dio spektra se gotovo potpuno apsorbira pa preostaje samo žuto i crveno ozračenje [7].

2.2.3. Bilanca ozračenja u sustavu Zemlja-atmosfera

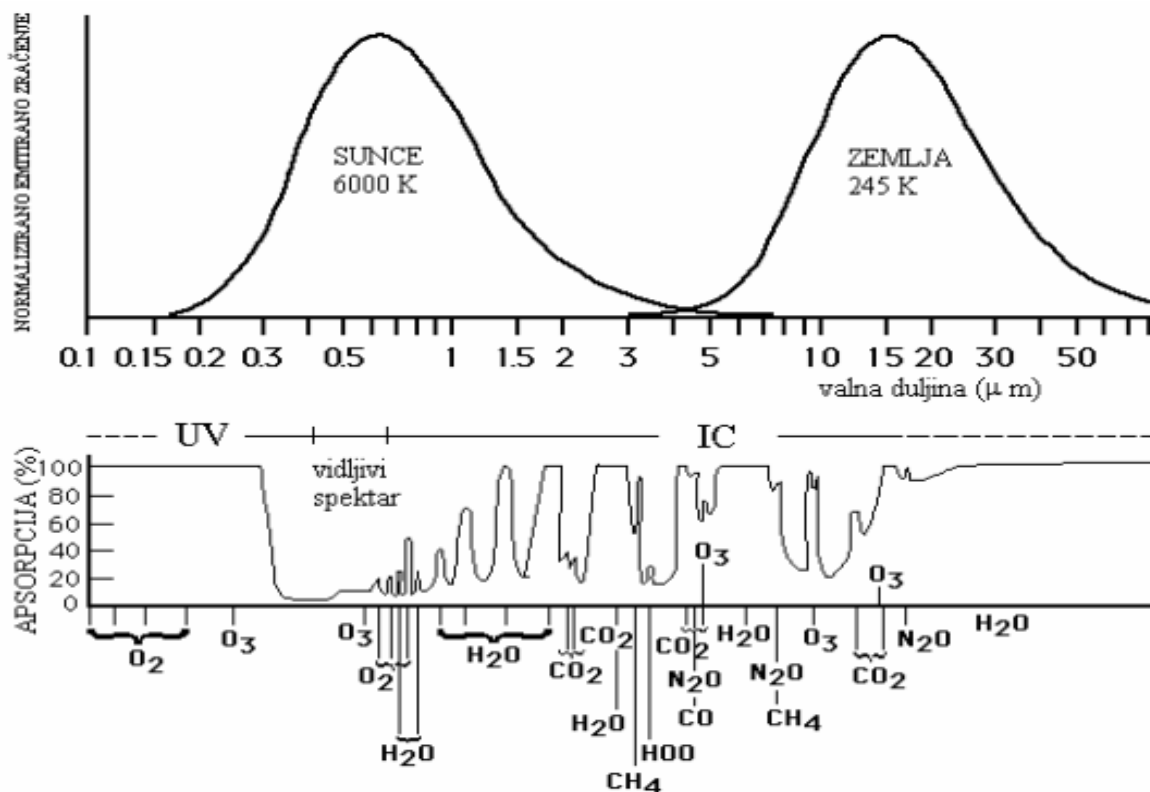
Dio Sunčeve energije prolaskom kroz atmosferu reflektira se od čestica u atmosferi, oblaka i graničnih ploha (vodene površine, snijeg, pustinje, šume), te se vraća u svemir. Različiti tipovi podloge reflektiraju različite udjele dolaznog ozračenja, što se opisuje pomoću *albedo* faktora, koji se definira kao omjer odbijenog i dolaznog ozračenja. Od kratkovalnog Sunčevog ozračenja koje stigne na vrh atmosfere, u prosjeku se samo oko 20 % apsorbira u atmosferu i oblake, oko 30 % se zbog raspršenja i refleksije vraća u svemir, a preostalih 50 % dolazi do Zemljine površine [5].



Slika 3. Bilanca ozračenja u sustavu Zemlja-atmosfera [6]

Slika 3. prikazuje prosječno stanje tijekom višegodišnjeg razdoblja (u različitim izvorima se mogu naći nešto drugačije vrijednosti pojedinačnih komponenti bilance, ovisno o tome na koje razdoblje se odnose). Potrebno je uočiti da je neto dobitak/gubitak energije gledan zasebno na vrhu atmosfere ($100 - 8 - 17 - 6 - 9 - 40 - 20$) jednak nuli. Slično vrijedi i u samoj atmosferi ($19 + 4 + 6 + 7 + 24 - 40 - 20 = 0$), te na Zemljinoj površini ($46 - 15 - 7 - 24 = 0$). To znači da je sustav Zemlja-atmosfera, ako ga se promatra tijekom duljeg razdoblja, u energijskoj ravnoteži. U ravnoteži su također i njegovi pojedini dijelovi (Zemljina površina, atmosfera i vrh atmosfere). Kada ne bi bilo tako, sustav bi se s vremenom ili ohlađivao ili zagrijavao. Promatra li se sustav tijekom kraćeg razdoblja (npr. nekoliko dana ili mjeseci), pojedini dijelovi sustava, kao i sustav u cjelini, mogu dobivati ili gubiti energiju [5].

Sunčevo ozračenje je kratkovalno, a Zemlje dugovalno. Slika 4. pokazuje normalizirano emitirano Sunčevo ozračenje pri temperaturi površine od 6000 K i Zemlje pri temperaturi površine od 245 K u ovisnosti o valnoj duljini te apsorpcijske značajke atmosferskih sastojaka. Vidljivo je da atmosferski sastojci puno učinkovitije apsorbiraju dugovalno (Zemljino) od kratkovalnog (Sunčevog) ozračenja. Atmosfera zbog apsorpcije ozračenja i sama dugovalno zrači. To ozračenje naziva se protuzračenje atmosfere [6].

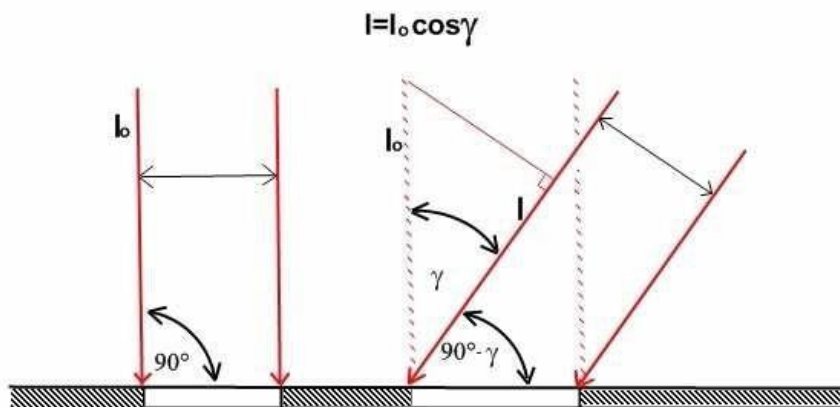


Slika 4. Ozračenje Sunca i Zemlje u ovisnosti o valnoj duljini (gore), te apsorpcijske značajke atmosferskih sastojaka (dolje) [6]

Zemljina površina apsorbirano zračenje dalje pretvara u toplinsko (dugovalno) ozračenje, te u senzitivnu i latentnu toplinu, koje se turbulentnim tokovima prenose u atmosferu. Najveći dio energije koju Zemlja gubi dugovalnim ozračenjem i turbulentnim tokovima topline apsorbira se i zadržava u samoj atmosferi. Ukupan iznos Sunčevog ozračenja i toplinske energije koji neće napustiti Zemljinu atmosferu je neto zračenje ($R_n = S_n + L_n$); gdje je S_n neto kratkovalno zračenje, a L_n neto dugovalno zračenje [7].

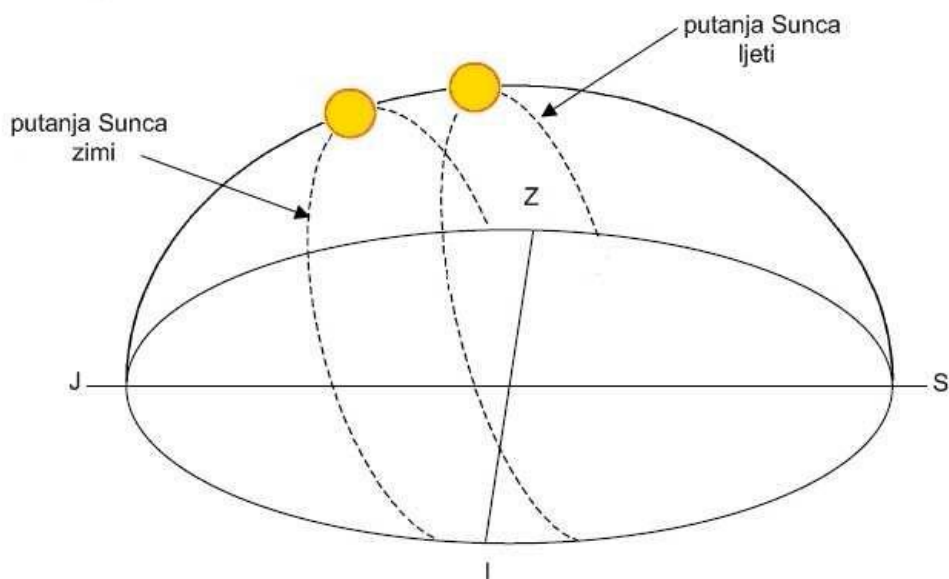
2.2.4. Kut upada Sunčevih zraka

Zemljina putanja oko Sunca je elipsa maloga ekscentriciteta. Početkom siječnja Zemlja se nalazi u perihelu i prima 6,9 % Sunčeve energije više nego u srpnju kada se nalazi u afelu, zato što gustoća toka energije opada s kvadratom udaljenosti od izvora. Međutim, ovaj utjecaj nije primaran za sezonsku varijaciju dozračene energije. Važniji je nagib Zemljine osi prema okomici ravnine ekliptike, koji u aktualnoj fazi Zemljine povijesti približno iznosi $23,45^\circ$ i glavni je uzrok pojave godišnjih doba. Sunčeve zrake padaju okomito na Zemljinu površinu samo između obratnica ($23,5^\circ$ N i $23,5^\circ$ S) i to dva puta godišnje, a na samim obratnicama jednom godišnje. Tada Zemljina površina prima najviše energije, jer okomit upad Sunčevih zraka uzrokuje najjače zagrijavanje. Ako zrake dolaze na Zemljinu površinu pod većim kutom (u odnosu na okomicu), ista se količina ozračenja raspodjeljuje na veću površinu i zagrijavanje slabi. Matematički se smanjenje intenziteta ozračenja opisuje trigonometrijski gdje I_0 predstavlja maksimalni intenzitet ozračenja pri okomitom upadu Sunčevih zraka. Kako se kut upada γ povećava, intenzitet ozračenja I smanjuje se za kosinus promatranog kuta upada γ [8].



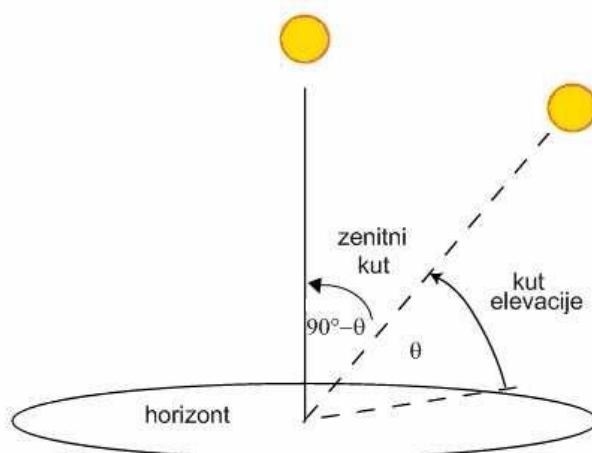
Slika 5. Prikaz smanjenja intenziteta zračenja [7]

Zimi se Sunce prividno spušta prema južnoj obratnici, pa u našim krajevima Sunčeve zrake upadaju na Zemljinu površinu pod većim kutom, te se energija raspoređuje na veću površinu. Zrake također prolaze kroz deblji sloj atmosfere u kojemu je intenzitet ozračenja oslabljen apsorpcijom, refleksijom i raspršenjem na atmosferskim česticama i plinovima. Intenzitet ozračenja opada u odnosu na maksimum ozračenja koji Zemlja prima ljeti, kada Sunčeve zrake padaju pod manjim kutom (bliže okomici) na njenu površinu [7].



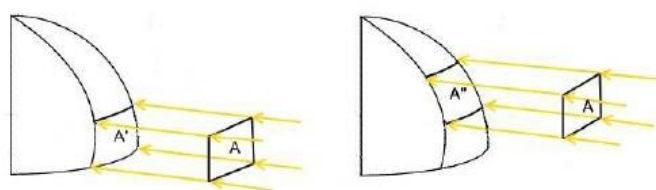
Slika 6. Sezonska promjena položaja Sunca [7]

Položaj Sunca na nebu značajno se mijenja tijekom godine, ali i tijekom dana. Dnevne varijacije dozračene energije ovise o dnevnom hodu Sunca na nebu. On se određuje pomoću kuta elevacije, odnosno visine Sunca na nebu u odnosu na horizont, koji je funkcija geografske širine i Sunčeve deklinacije. Ozračenost plohe najveća je za maksimalni kut elevacije koji se postiže u Sunčevo podne. Kako se Sunce približava horizontu, optička masa i zenitni kut rastu, a intenzitet ozračenja slabi [4].



Slika 7. Dnevni hod Sunca [7]

Na meridionalni gradijent dozračene energije, osim nagiba Zemljine osi na ekliptiku, utječe i sferni oblik Zemlje. Zakrivljenost Zemljine površine smanjuje ozračenje na višim geografskim širinama, jer Sunčevo ozračenje upada pod većim kutom. Na Slici 7. prikazan je utjecaj geografske širine, koji se očituje u činjenici da se jednaka količina energije u višim geografskim širinama raspoređuje na veću površinu (A'') nego na ekvatoru (A'). Stoga dotok ozračenja (po jedinici površine) na vrhu atmosfere postiže maksimum nad područjem ekvatora, a smanjuje se prema polovima.

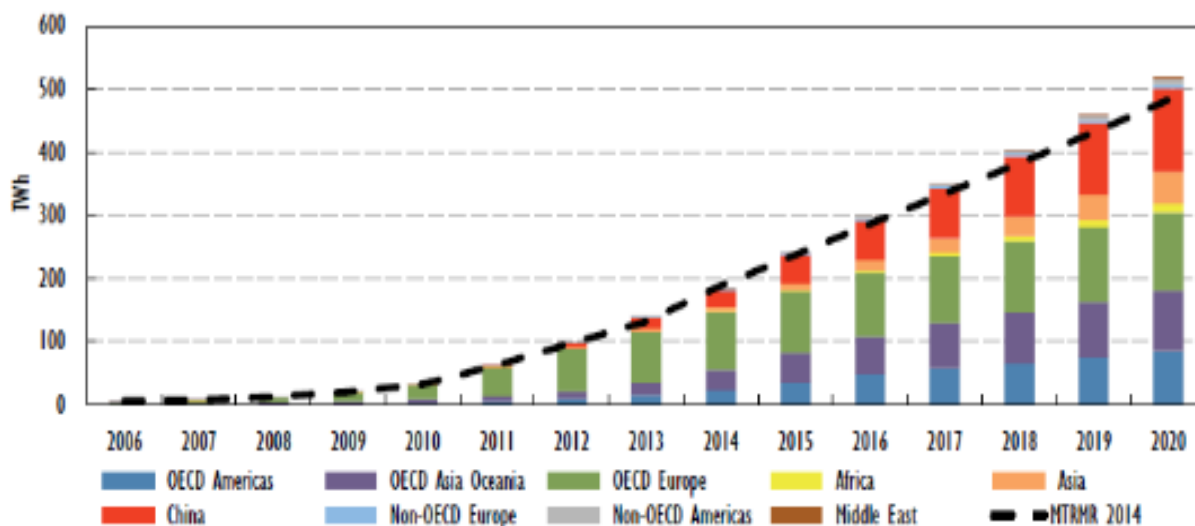


Slika 8. Utjecaj sferičnog oblika Zemlje na dozračenu energiju [7]

Na lokalnu prostornu varijabilnost Sunčevog ozračenja izrazito utječe okolna topografija terena. Različiti dijelovi reljefa primaju različite količine Sunčevog ozračenja. Varijacije u nadmorskoj visini, nagibu, orijentaciji, zasjenjenju i refleksiji uzrokuju lokalne gradijente u dozračevoj energiji. Ako na uskom području topografija varira, mogu se javiti izražene prostorne i vremenske nehomogenosti parametara energije i vodene bilance na mikroskali (npr. temperatura zraka i tla, evapotranspiracija, vlažnost tla, topljenje snijega, svjetlost raspoloživa za proces fotosinteze i dr.) [7].

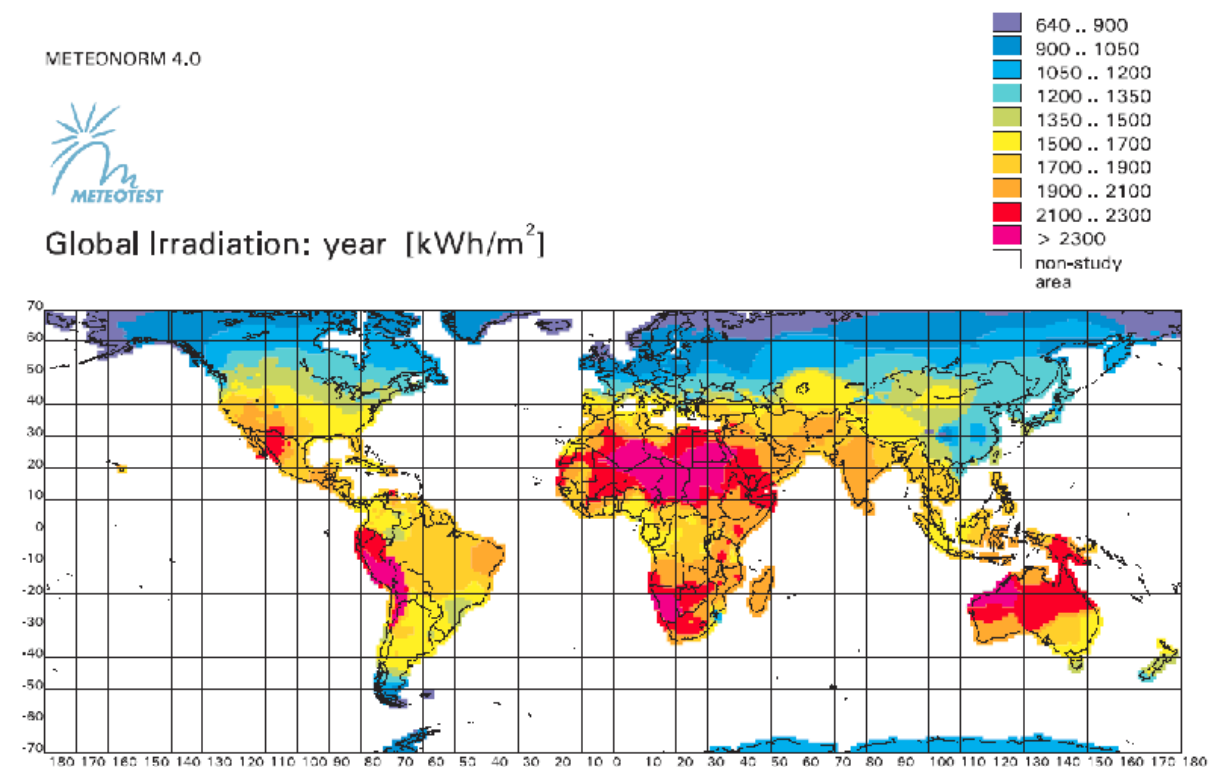
2.3. Sunčev potencijal područja

2.3.1. Energija Sunca u svijetu



Slika 9. Sunčeva energija po regijama [9]

Prema podacima koje je sakupila internacionalna agencija za energiju IEA (engl. International Energy Agency), vidi se da je Europa trenutno vodeća u pretvorbi Sunčeve energije u električnu, ali prema predviđanjima za 2020. g. brzo ju dostiže Azija, a posebice Kina. Veliku zaslugu u tome ima Europska komisija koja je donijela strategiju *Plan za obnovljivu energiju – energija iz obnovljivih izvora u 21. stoljeću: stvaranje održive budućnosti* koja obvezuje članice EU na 20 % udjela obnovljivih izvora energije u potrošnji energije do 2020.g. Europsko udruženje industrije fotonapona EPIA (engl. European Photovoltaic industry Association) koje broji preko 200 tvrtki u svijetu koje se bave industrijom FN tehnologije (95 % europskih tvrtki, odnosno 85 % svjetskih) dalo je jasnu poruku s pogledom do 2020., odnosno 2040. godine. EPIA predviđa da će Sunčana FN tehnologija do 2020. godine pokriti 12 % potrošene električne energije u Europskoj uniji, a u 2040. čak 28 % [9].



Slika 10. Srednja godišnja ozračenost svijeta na horizontalnu plohu [10]

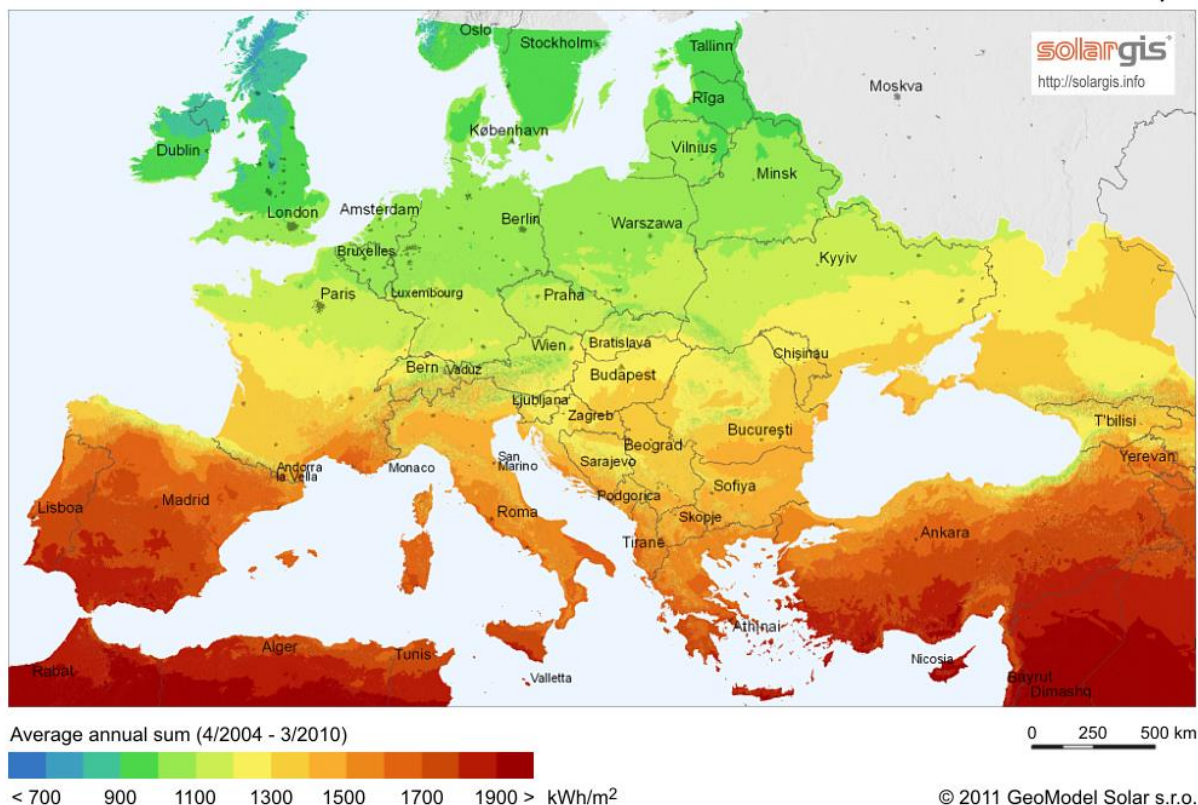
Ozračenje/iradijancija/insolacija (E , W/m^2) je gustoća energetska toka Sunčevoga ozračenja koji upada na određenu površinu, a ozračenost/iradijacija (H , Wh/m^2 , J/m^2) je gustoća dozračene energije koja u promatranom vremenu upadne na jediničnu površinu plohe (2) [10]:

$$H = \int E dt \quad (2)$$

Izvan ekvatorijalnih i suptropskih područja, gdje su uvjeti za iskorištavanje Sunčeve energije optimalni, sunčani potencijal postupno opada idući prema polovima. Tome je razlog sve duži put Sunčevih zraka kroz atmosferu, što za posljedicu ima veće raspršenje i manju količinu energije koja dolazi do Zemljine površine. Za neku geografsku širinu Sunčev potencijal je to veći što je veći prosječni broj sunčanih sati tijekom dana, odnosno što je manja prosječna količina naoblake. Slika 10. prikazuje osnovnu prostornu razdiobu ozračenosti na Zemlji, gdje su jasno označena područja najvećeg potencijala crvenom bojom. Sukladno tome, Europa, koja se nalazi u umjerenim širinama, nije prebogata Sunčevim potencijalom (Slika 11.). Unatoč tome, proizvodnja i ugradnja uređaja za dobivanje električne energije iz Sunčeve u Europi je vrlo intenzivna i to s trendom stalnog, gotovo eksponencijalnog rasta. Tome značajno doprinosi i intenzivan razvoj tehnologije sunčanih FN članaka [1].

Global horizontal irradiation

Europe



Slika 11. Godišnja ozračenost Europe na horizontalnoj plohi [16]

2.3.2. Sunčeva energija u Hrvatskoj

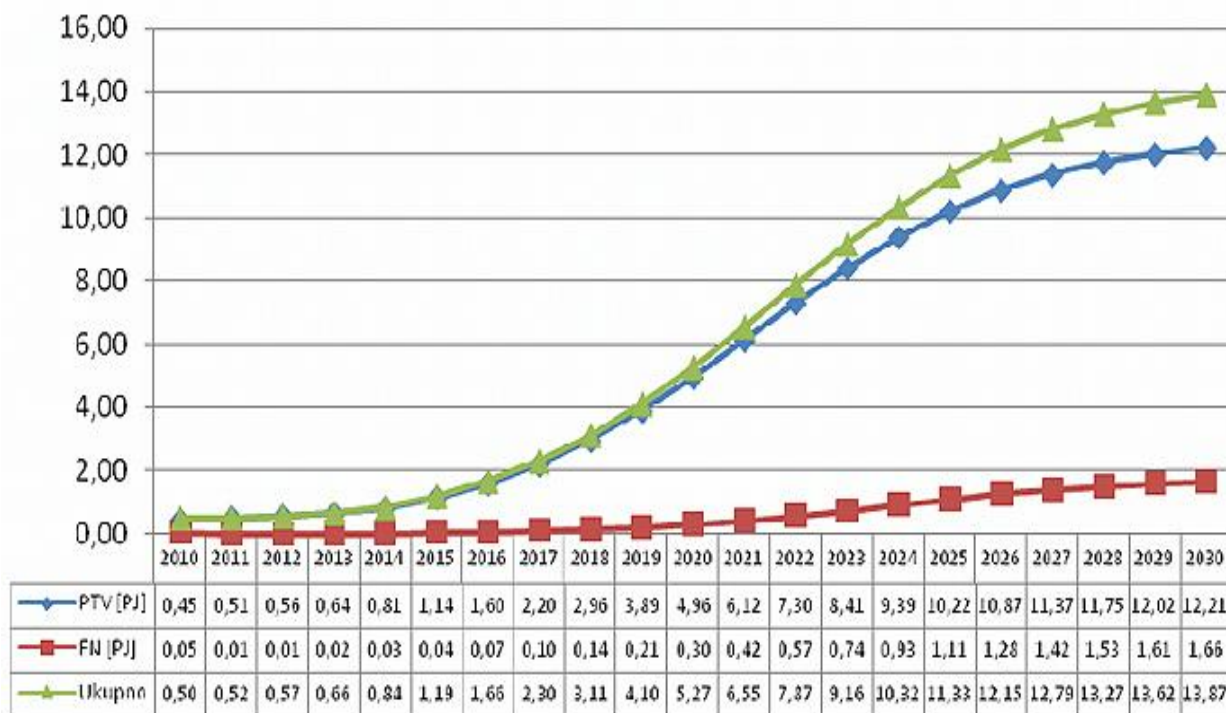
U pogledu hrvatskih planova za 2020. godinu, u skladu s Direktivom 2009/28/EZ o obnovljivim izvorima energije, Hrvatska se obvezala dostići udio od 20 % energije iz obnovljivih izvora u konačnoj bruto potrošnji energije, što je ugrađeno u Strategiju energetske razvoja Republike Hrvatske [10]. Kao novija članica EU koja ima dobre preduvjete za korištenje Sunčeve energije, Hrvatska se trenutno nalazi na samom dnu Europe po instaliranim sustavima za korištenje Sunčeve energije. Stoga se može reći da u Hrvatskoj nije iskorištena komparativna prednost u pogledu uporabe Sunca, iako dolazi do velike ekspanzije zadnjih godina radi velikog pada cijene tehnologije [16].

Tablica 1. Ukupna snaga FN elektrana (W/stan) [12]

PV vati po stanovniku						
	DRŽAVA	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.
1	Njemačka	304,3	399,5	447,2	474,1	489,8
2	Italija	210,5	269,0	295,1	303,5	311,3
3	Češka	186,0	192,5	196,1	196,1	197,7
4	Belgija	165,5	240,0	267,3	277,2	286,7
–	EU	102,2	136,3	155,8	171,5	186,1
5	Španjolska	91,3	97,8	100,7	102,9	106,0
6	Slovačka	89,8	95,7	99,3	109,0	109,0
7	Luksemburg	59,9	89,9	186,2	200,1	222,0
8	Grčka	55,8	136,7	233,7	236,8	241,7
9	Slovenija	44,1	105,7	123,8	124,2	124,8
10	Francuska	43,5	61,6	71,6	87,6	99,1
(11...19)	-	-	-	-	-	-
20	Švedska	2,0	2,5	4,5	8,2	13,3
21	Latvija	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
22	Mađarska	0,4	0,4	1,6	3,9	14,0
23	Irska	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5
24	Rumunjska	0,1	0,3	51,1	64,8	66,7
25	Hrvatska	0,1	0,1	5,1	8,1	10,6
26	Estonija	0,1	0,1	0,1	0,1	3,1
27	Litva	0,0	2,0	22,9	23,2	25,0
28	Poljska	0,0	0,1	0,1	0,6	2,03

Prema podacima kompanije EurObservER, vidljivo je da je 2013. godine ukupna snaga FN elektrana iznosila 24 MWp, odnosno 5,1 W/stan, dok je 2015. godine skočila na 10,6 W/stan. Prema procjenama potencijala Sunčeve energije izdanim u Solarnom priručniku iz 2007. godine, tehnički potencijal proizvodnje električne energije iz FN sustava i koncentriranih sunčanih elektrana u Hrvatskoj iznosi oko 33 TWh/god. [12].

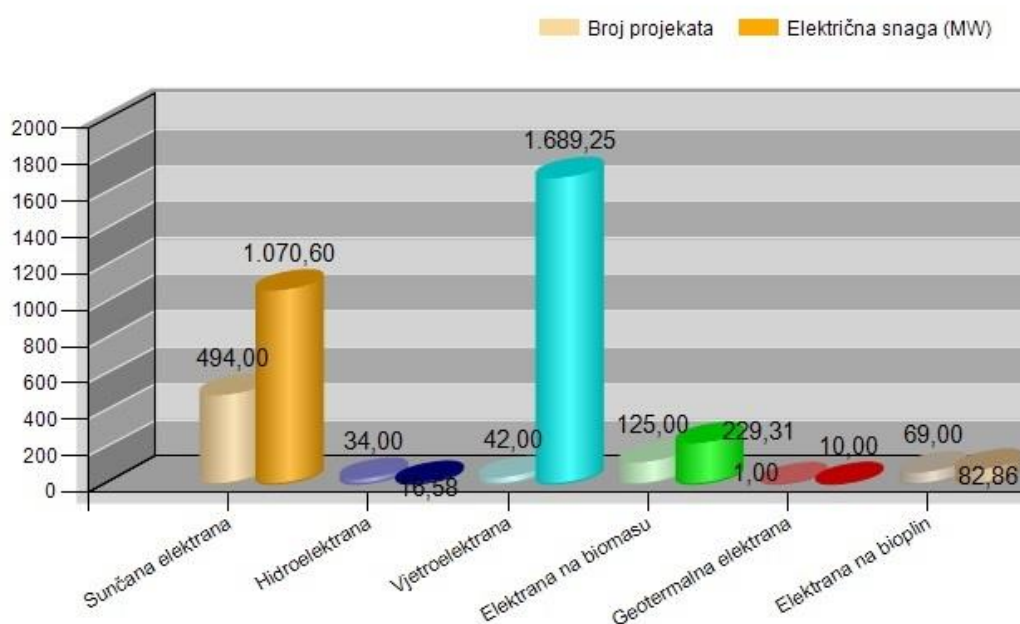
Električna energija proizvedena iz Sunčeve energije u FN sustavima i koncentriranim sunčanim elektranama mogla bi postati tržišno konkurentna oko 2020. godine, te bi uz iskorištavanje nešto manje od 1 % tehničkog potencijala ekonomski potencijal iznosio oko 0,3 TWh/god., što odgovara snazi od oko 200 MW. U Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske iz 2008. godine zadan je cilj prema kojemu za FN sustave stanje u Hrvatskoj do 2020. godine mora biti izjednačeno stanju Španjolske gledano po glavi stanovnika iz 2008. godine (11,71 W po stanovniku), te stanju Njemačke iz iste godine do 2030. godine (više od 45 W po stanovniku). Uz to, pretpostavljena stopa rasta korištenja FN sustava je 68 % godišnje do 2020. godine, te 20 % do 2030. godine [12]. Na Slici 12. prikazana je dinamika rasta korištenja Sunčeve energije u Hrvatskoj do 2030. godine [13]. Nažalost, Hrvatska nije napravila strategiju za toplinske sunčane elektrane.



Slika 12. Dinamika rasta korištenja Sunčeve energije u Hrvatskoj do 2030. godine [13]

U Strategiji stoji kako se očekuje da će do 2030. godine 15 % postojećih objekata i 50 % novoizgrađenih objekata s nekim oblikom iskorištavanja Sunčeve energije sudjelovati u vlastitoj energetskej bilanci; da će instalirana snaga FN sustava iznositi više od 45 W/stanovniku, te da će Hrvatska biti na četvrtom mjestu u Europi promatrano po MW Sunčevih toplinskih sustava po stanovniku [13].

Prema podacima Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE) o povlaštenim proizvođačima s kojima HROTE ima sklopljen ugovor o otkupu električne energije, do početka ove 2017. godine instalirano je 1.213 postrojenja (FN sustavi, Sunčane elektrane), ukupno instalirane snage od 43.988,21 kW [14], a prema Pregledu projekata upisanih u Registar OIEKPP izdanima od strane Ministarstva gospodarstva, rada i poduzetništva registrirano je 494 Sunčanih elektrana ukupnog kapaciteta 1070,60 MW [16]. Preko navedenih podataka vidljivo je da ukoliko Hrvatska nastavi ovakvim tempom, neće niti približno uspjeti ostvariti zadane ciljeve unatoč dokazanom velikom potencijalu.

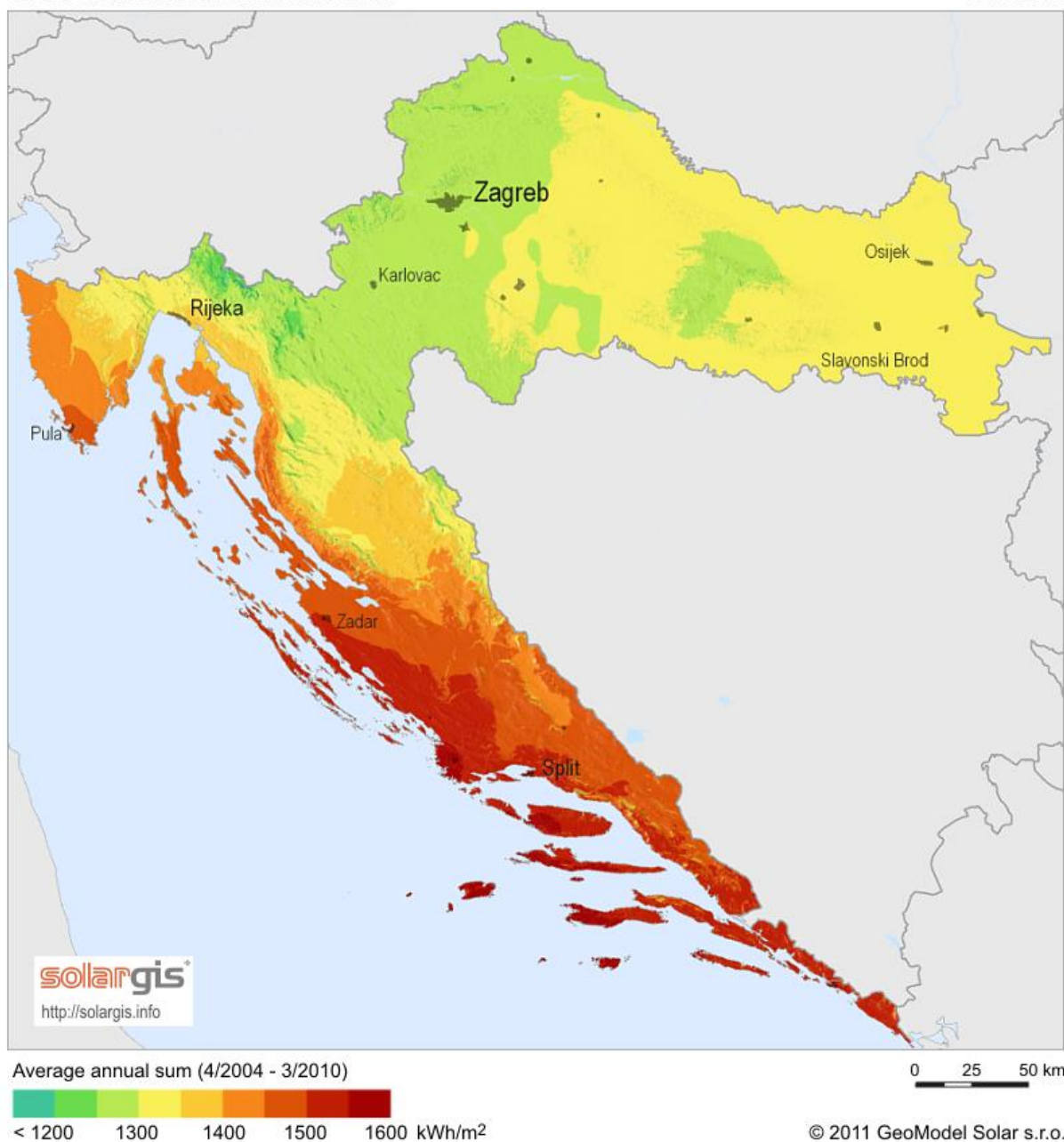


Slika 13. Odnos broja postrojenja i ukupne električne snage postrojenja po vrstama postrojenja [16]

Prema Slici 14. vidljivo je da Primorsko-goranska županija ima najveći Sunčev potencijal koji je u nekim njezinim područjima (otoci: Lošinj, Unije, Susak, veći dio Cresa i Raba) vrlo blizu uvjetima u kojima su izgrađene najveće sunčane elektrane u Europi ($1,5 - 1,6 \text{ MWh/m}^2$). Na planinskom dijelu ozračenost iznosi $1,30 \text{ MWh/m}^2$, a u Biogradu $1,35 \text{ MWh/m}^2$. Dakle županije najpogodnije za razvoj projekata koji uključuju Sunčevu energiju su: Splitsko-dalmatinska u kojoj se ozračenost kreće između $1,60 - 1,35 \text{ MWh/m}^2$, Šibensko-kninska sa srednjom dnevnom ozračenosti od $1,54 \text{ MWh/m}^2$ i Dubrovačko-neretvanska s ozračenosti $1,60 - 1,50 \text{ MWh/m}^2$ [16].

Global horizontal irradiation

Croatia

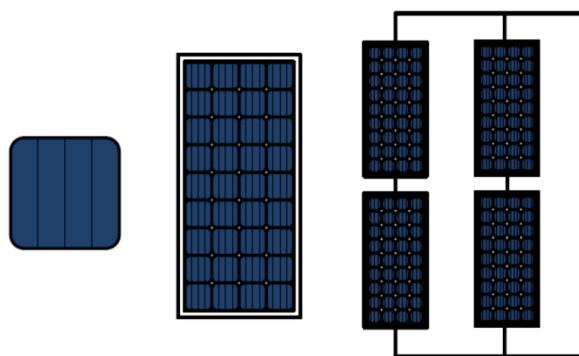


Slika 14. Godišnja ozračenost Hrvatske na horizontalnu plohu [15]

Najviše FN sustava se nalazi na sjeverozapadu Hrvatske dok je Dalmacija trenutno najslabije razvijena. Najveće sunčane elektrane su elektrana u Stankovcima koja sa 8,5 tisuća panela, strujom opskrbljuje 400 domaćinstava i elektrana Kanfanar 1 u Istri snage 1 MW koja proizvodi 1,2 milijuna kWh energije godišnje putem više od 4.000 FN modula što opskrbljuje 350 kućanstava [17]. No promatrajući prijašnje trendove u svijetu, lako je zaključiti da su ciljevi koje je Hrvatska odredila s obzirom na svoj položaj i potencijal, ispod trendova koje provode druge razvijene zemlje svijeta.

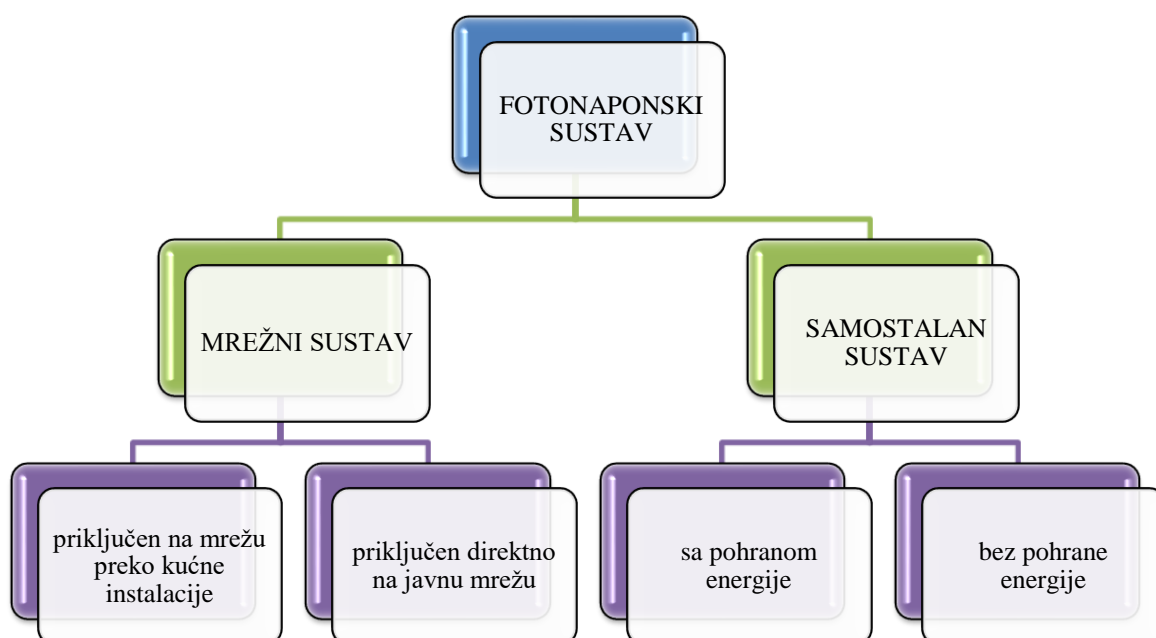
3. FOTONAPONSKI (FN) SUSTAVI

Snaga koju proizvodi jedan FN članak je relativno mala, pa se zbog toga u praksi FN članci spajaju u FN module. Dakle, modul se sastoji od nekoliko članaka koje su u seriju ili paralelu spojene mehanički i električki [1].



Slika 15. Spajanje FN članaka [28]

Tipični FN modul sastoji se od 36 članaka te ima izlazni napon od 12 V. Obično se svi članci u jednom modulu spajaju serijski te je poželjno da oni budu što sličnije osvjetljeni i sličnih značajki. U cilju dobivanja još većih snaga, povezani moduli po istom principu čine FN sustav.



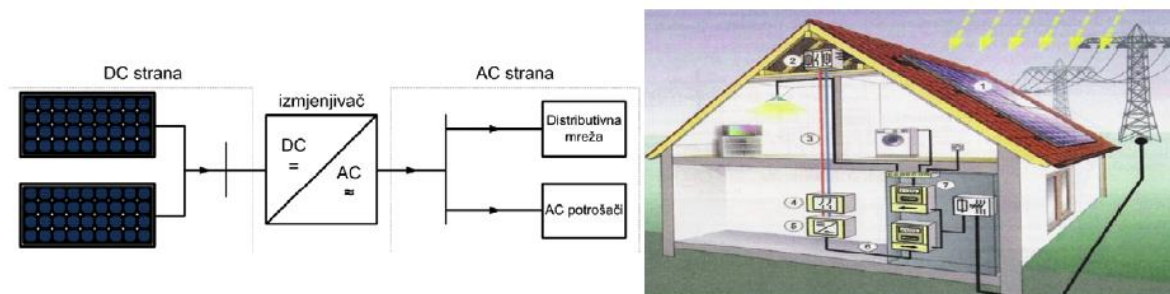
Slika 16. Podjela FN sustava

FN sustavi se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe. Prvu grupu čine sustavi koji nisu priključeni na mrežu, a mogu biti sa ili bez pohrane energije, što ovisi o vrsti primjene i načinu potrošnje energije, te hibridni sustavi koji mogu biti s vjetroagregatom, kogeneracijom ili dizelskim generatorom. Samostalni sustavi koriste se kod pokretnih aplikacija kao što je korištenje FN članaka kod manjih uređaja (osvjetljenje i dekoracija prostora, kućanski aparati male potrošnje), pa do područja korištenja u sektoru kampera, nautike i prometa [7].



Slika 17. Pozdrav Suncu u Zadru kao primjer samostalnog FN sustava [27]

Drugoj grupi pripadaju danas sve rasprostranjeniji i suvremeniji, mrežni sustavi, koji proizvedenu električnu energiju predaju u elektroenergetski sustav. FN sustavi priključeni na javnu mrežu preko kućne instalacije pripadaju distribuiranoj proizvodnji električne energije. Dakle, oni omogućavaju povezivanje na sustave priključene uglavnom na niskonaponsku razinu elektroenergetskog sustava. Kako bi mogli predati energiju u javnu mrežu, zainteresirani trebaju prvo steći status povlaštenog proizvođača, što znači da treba ishoditi odobrenja za izgradnju, zatim izvršiti upis postrojenja i na kraju sklopiti ugovor o otkupu električne energije. Sustavi koji su izravno priključeni na javnu energetska mrežu, svu proizvedenu električnu energiju predaju u elektroenergetski sustav. Za njih je karakteristična veća snaga i uglavnom se instaliraju na većim površinama u blizini elektroenergetske mreže. Za ove sustave se može reći da predstavljaju prave sunčane FN elektrane [7].



Slika 18. FN sustav spojen na mrežu [28]

3.1.1. Princip rada FN članaka

Rad sunčanih FN članaka zasnovan je na fotoelektričnom učinku, kojega je 1839. godine otkrio Alexandre-Edmond Becquerel, a 1905. godine teorijski objasnio Albert Einstein, koji je za taj doprinos 1921. dobio Nobelovu nagradu za fiziku. Trebalo je proći još tridesetak godina kako bi se ta spoznaja primijenila u praksi pa je tako prvi FN (silicijev - Si) članak razvijen 1941. godine, ali je njegova učinkovitost pretvorbe bila ispod 1 %. Grupa istraživača u Bell Laboratories u New Yorku (Pearson, Fuller i Chapin) je 1954. godine izradila Si FN članak, čija je učinkovitost iznosila 6 % i prvi FN modul pod imenom Bellova sunčana baterija. Proizvodna cijena prvih FN članaka je bila vrlo visoka, pa zbog toga oni nisu našli komercijalnu primjenu. Međutim, vrlo brzo FN članci postaju nezamjenjiv izvor električne energije na satelitima i svemirskim brodovima i stanicama [25].

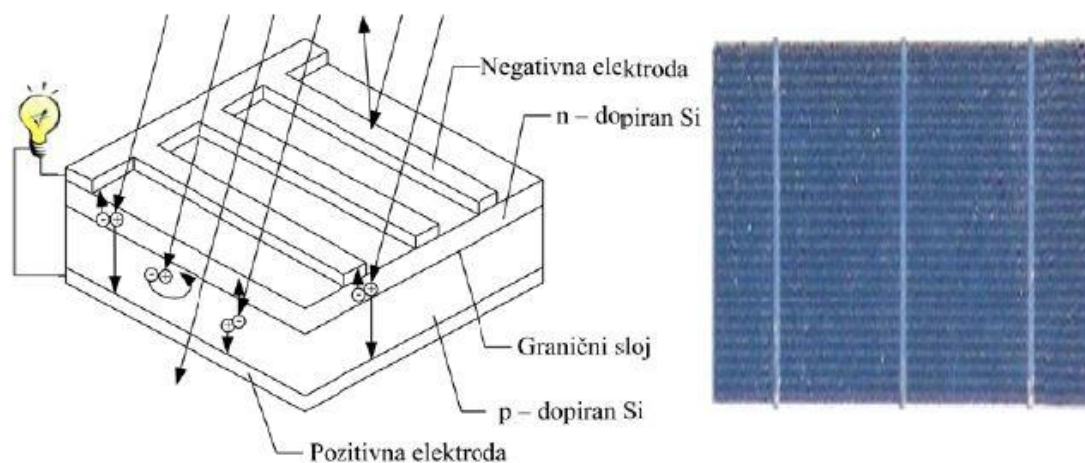
Sunčevo elektromagnetsko ozračenje ima dualnu značajku: ponaša se i kao val i kao čestica (foton). Prema postavkama kvantne teorije, fotoni nemaju masu i u vakuumu se gibaju brzinom svjetlosti. Oni posjeduju energiju koja linearno ovisi o frekvenciji, odnosno obrnuto proporcionalno o valnoj duljini prema Planckovoj relaciji (3) [7]:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

U različitim tvarima, pa tako i metalima i poluvodičima, postoje elektroni koji su ili valentni (vezani u atome i molekule) ili slobodni. Za nastanak električne struje (energije) važni su upravo slobodni elektroni. Vezani elektroni mogu se osloboditi veza s atomom (ili molekulom) ukoliko prime energiju koja je veća od energije kojom su vezani. Potrebnu energiju za oslobađanje u slučaju fotoelektričnog učinka, vezani elektroni dobivaju u sudaru s fotonima. Fotoni moraju imati energiju veću ili jednaku potrebnom izlaznom radu, odnosno energiji vezivanja elektrona, pri čemu se višak energije pretvara u kinetičku energiju elektrona (4) [24]

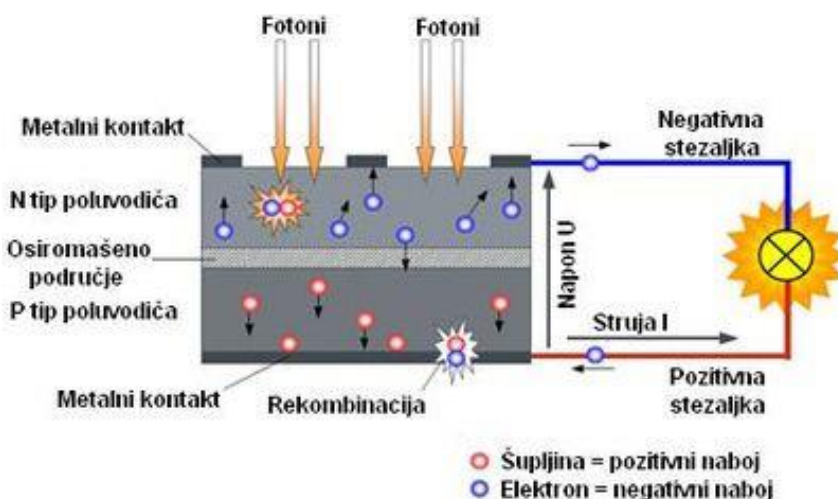
$$E = W_i + E_k \quad (4)$$

Izlazni rad ovisi o materijalu na kojemu se fotoelektrični učinak događa. Ukoliko je energija fotona manja od potrebnog izlaznog rada, elektron se neće osloboditi, pa je poželjno da materijal u kojemu se odvija pretvorba Sunčeve u električnu energiju ima što manji izlazni rad [7].



Slika 19. Princip rada FN članka [1]

FN članak je poluvodički p-n spoj. Članak je pločica p-tipa silicija, a na površini pločice su dodane primjese (npr. fosfor) što čini tanki sloj područja n-tipa. Na prednjoj površini, nalazi se metalna rešetka (pokriva manje od 5 % površine tako da ne bi utjecala na apsorpciju Sunčevog ozračenja) koja služi za skupljanje naboja nastalih apsorpcijom fotona iz Sunčevog ozračenja. Na rešetci se nalazi i antirefleksijski sloj, koji povećava djelotvornost članka, dok se na stražnjoj strani članka nalazi metalni kontakt [24].



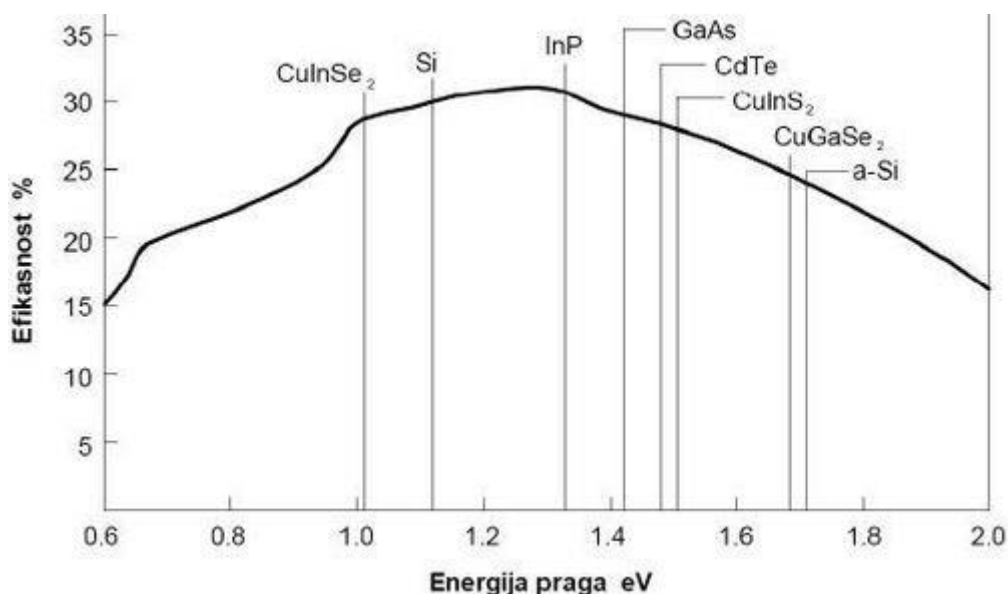
Slika 20. Fotoelektrični učinak FN članka [25]

Fotoelektrična energija nastaje kada se slobodni (foto) elektroni pod djelovanjem električnog polja počnu usmjereno gibati u zatvorenom strujnom krugu, stvarajući time struju. Električno polje ugrađeno je u materijal (poluvodič) na kojemu se fotoelektrični učinak događa, i to u

njegovom tzv. osiromašenom, pn području diode. Za poluvodiče je karakteristično da se u njima, osim slobodnih elektrona, mogu pronaći i tzv. šupljine. One su nositelji pozitivnog naboja koji nastaju kao nusproizvod u procesu prijelaza valentnog elektrona u slobodno stanje. Taj proces naziva se generacija, a obrnuti proces (popuna šupljine slobodnim elektronom) poznat je pod nazivom regeneracija. Poželjno je da se par *šupljina-slobodni* elektron stvori što bliže osiromašenom području, kada ih električno polje bez teškoća razdvaja i usmjerava na suprotne strane (fotoelektroni prema n strani, a šupljine prema p strani poluvodiča). Nagomilavanjem fotoelektrona i šupljina na različitim stranama poluvodiča stvara se elektromotorna sila (napon) koja, u slučaju da se stvori strujni krug s nekim trošilom ili akumulatorom, daje struju, odnosno trošilo će iskoristiti električnu energiju [24].

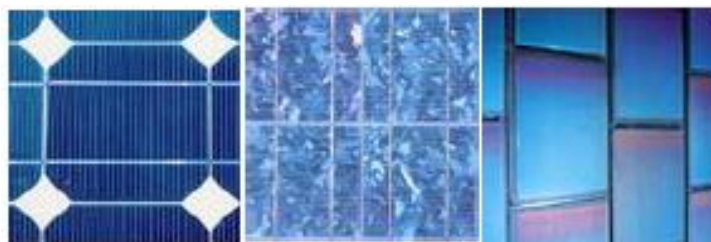
3.1.2. Vrste FN članaka

Osim energije vezanja, dodatnu prepreku nositeljima naboja (šupljine i (foto) elektrona) stvara električno polje osiromašenog područja. Slobodni nositelji naboja nastali fotoelektričnim učinkom moraju zato imati dovoljno energije da svladaju i tu energetska barijeru, koja bi trebala biti što manja. Ona pak ne smije potpuno iščeznuti, jer održava električno polje koje je neophodno za razdvajanje naboja. Iz toga je vidljivo da je učinkovitost u funkciji širine (iznosa) energetske barijere, koja poprima različite vrijednosti za različite pn spojeve. Teorijski izračunata optimalna vrijednost iznosi oko 1,4 eV (elektron-volti) [7].



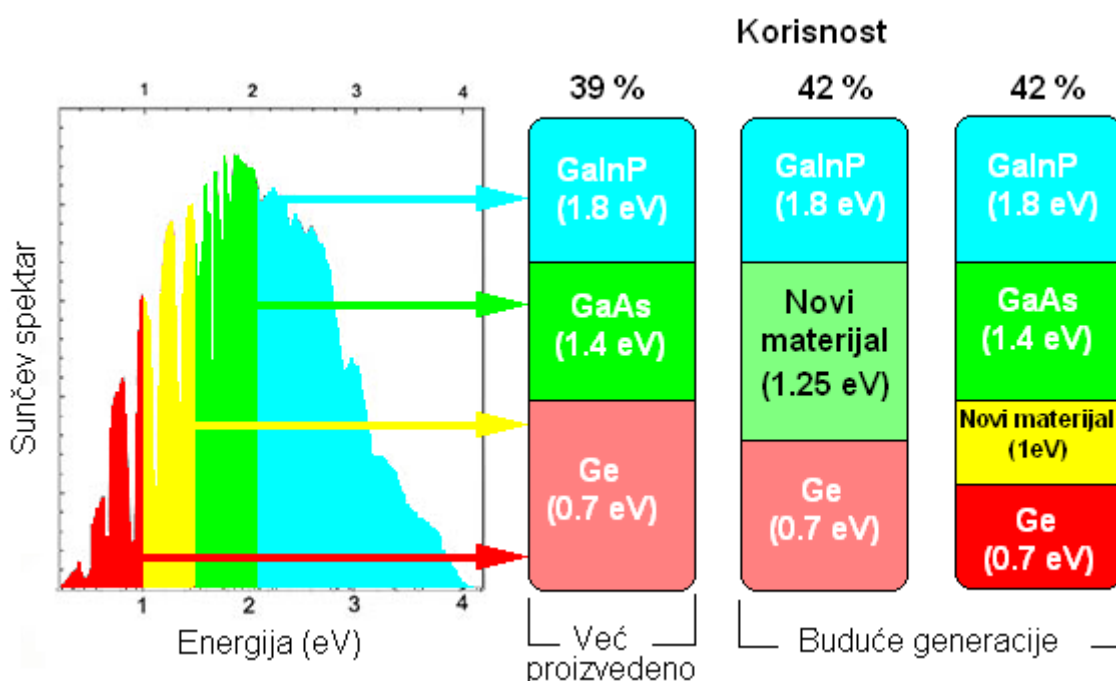
Slika 21. Teorijski maksimum učinkovitosti FN članaka pri standardnim uvjetima, ovisno o vrsti članka i energiji praga [24]

Fn članci proizvode se najčešće iz silicija i to kao monokristalni, polikristalni i amorfni.



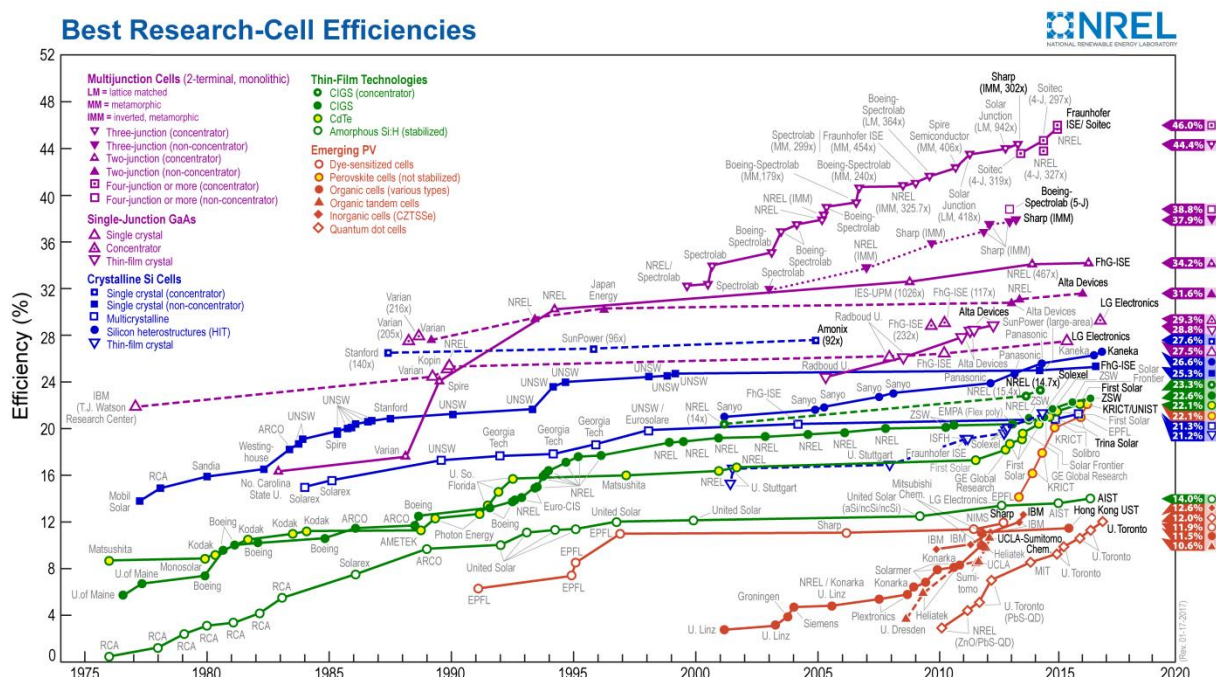
Slika 22. Monokristalni, polikristalni i amorfni FN članci [24]

Ne mogu svi fotoni u spektru Sunčevog zračenja koji dopijevaju na neki materijal izazvati fotoelektrični učinak jer su njihove energije različite. Svaki materijal ima karakterističnu graničnu vrijednost energije fotona koja u njemu može pobuditi fotoelektrični učinak. Tako na primjer, amorfni silicij ima veći razmak među pojasevima (1,7 eV) od kristalnog silicija (1,1 eV), što znači da apsorbira vidljivi dio spektra Sunčevog ozračenja snažnije nego infracrveni dio spektra. Veća učinkovitost od teorijske se postiže kombinacijom poluvodičkih materijala, kvantnim točkama i fokusiranjem sunčeva ozračenja [24].



Slika 23. Prikaz poluvodičkih materijala korištenih za izradu FN članaka koji koriste različite dijelove spektra Sunčevog ozračenja [7]

Ukoliko se pri izradi FN članka koristi samo jedan materijal, dio fotonskog spektra ostat će neiskorišten. Tome se u novije vrijeme doskočilo razvojem tzv. višeslojnih sunčanih FN članaka koji imaju dva ili više pn sloja od različitih poluvodičkih materijala. Njihova je značajka da imaju učinkovitost veću od pojedinačnih materijala od kojih su načinjeni. Prema istraživanju znanstvenika laboratorijskog centra za energiju u Americi (NREL – National Renewable Energy Laboratory) 2016. godine, njihova učinkovitost je dostigla čak 46 %, što je značajno više od drugih FN članaka [19].



Slika 24. Vremenski razvoj učinkovitosti pretvorbe energije sunčanih FN članaka [19]

Kao poluvodič u FN člancima još se uvijek najčešće koristi kristalni silicij u različitim morfološkim oblicima (monokristalni, polikristalni i amorfni), te niz drugih kristalinih materijala (kao npr. galij-arsenid (GaAs), kadmij-telurij (CdTe) i bakar-indij(galij)-diselenid ($\text{CuIn}(\text{Ga})\text{Se}_2$). Osim tehnologije kristalnih članaka, u novije je vrijeme u snažnom zamahu razvoj tehnologije tankog filma. Prednost je u tome što je štedljivija u korištenju materijala, uz omogućavanje fleksibilnije ugradnje prema potrebama jer je tanki film savitljiv. Debljina takvog sloja se kreće od nekoliko nanometara do nekoliko desetaka mikrometara. Energija uložena u proizvodnju takvih Sunčanih FN članaka vraća se u kraćem vremenu, uz nešto nižu učinkovitost. Mogu se koristiti i kao građevinski elementi u arhitekturi [19].



Slika 25. FN članak izrađen tehnologijom tankog filma [29]

Monokristalni FN Si članci mogu pretvoriti na jediničnom kvadratnom metru 1000 W/m² sunčevog ozračenja u 150 W električne energije. Za njihovu proizvodnju potreban je apsolutno čisti poluvodički materijal, a monokristalni štapići se vade iz rastaljenog silicija i režu na tanke pločice što omogućava relativno visoku učinkovitost.

Polikristalni FN članci mogu pretvoriti 1000 W/m² sunčevog ozračenja u 130 W električne energije s površinom članka od 1 m². Proizvodnja ovih članaka je ekonomski isplativija u odnosu na monokristalne. Tekući silicij se ulijeva u blokove, koji se režu u ploče. Tijekom skrućivanja stvaraju se kristalne strukture različitih veličina na čijim granicama se pojavljuju greške, zbog čega FN članak ovog tipa ima manju učinkovitost.

Amorfni FN Si članci imaju učinkovitost od otprilike 5 % što znači da na jednom kvadratnom metru, mogu pretvoriti 1000 W/m² sunčevog ozračenja u 50 W električne energije. Prevlačenjem tankog filma silicija po staklu ili nekoj drugoj podlozi dobiva se amorfni ili tankoslojni članak. Debljina sloja iznosi manje od 1 μm pa su i troškovi proizvodnje manji. Učinkovitost amorfni FN članaka je puno niža u usporedbi s drugim tipovima. Prvenstveno se koristi u opremi, gdje je potrebna mala snaga (satovi, kalkulatori) .

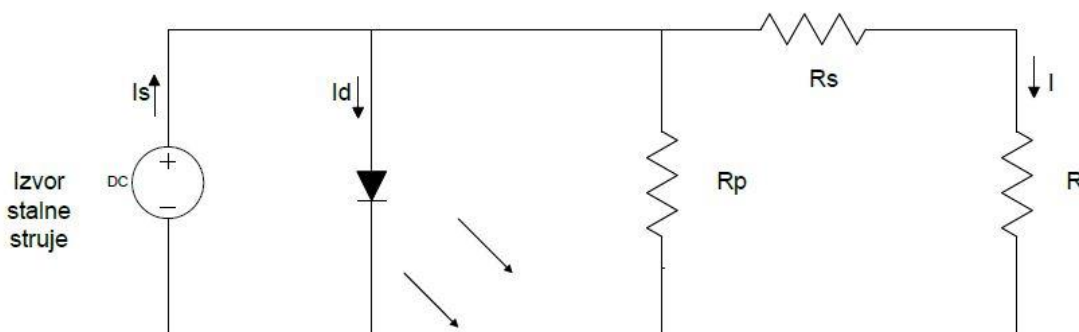
Galij-arsenidni (GaAs) FN članci imaju visoku učinkovitost (30 %) i slabe osjetljivosti na temperaturne promjene (za razliku od silicijevih), te na različita ozračenja. Izrađuju se od poluvodiča napravljenog iz mješavine galija (Ga) i arsena (As). Imaju visoku apsorpciju pa je potreban sloj debljine od samo nekoliko mikrona. Zbog visoke cijene koriste se u komercijalne svrhe samo u svemirskim programima i u sustavima s koncentriranim ozračenjem.

Galij-indijum-fosfidne/galij-arsenidni FN članci (GaInP/GaAs) su dvoslojni FN članci s iskoristivošću od 30 % koje se koriste za svemirske aplikacije.

Kadmij-telurijski (CdTe) FN članci imaju jeftinu tehnologiju izrade, dobre fizikalne značajke i učinkovitost od oko 16 %. Navedene dobre značajke dobro nisu bile dovoljne za

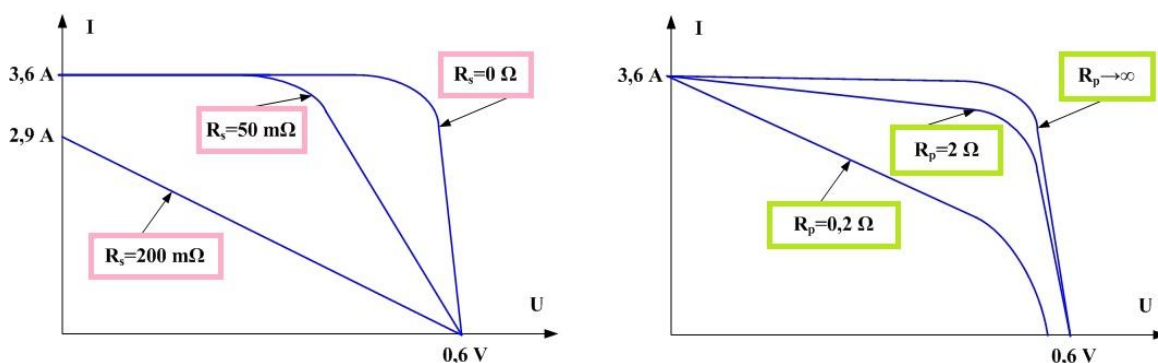
široku uporabu ovih članaka, zbog štetnosti po okoliš i sumnje u kancerogenost teškog metala kadmija. Kadmij-teleurid je spoj metala kadmija (Cd) i polumetala telurija (Te). Pogodan za uporabu u tankim FN modulima zbog fizikalnih značajki i jeftinih tehnologija izrade [17].

3.1.3. Nadomjesna shema FN članka i U-I karakteristika



Slika 26. Nadomjesna shema FN članka [24].

Strujni izvor je spojen paralelno s diodom, paralelni otpor R_p ovisi o značajkama članka i uglavnom je dovoljno velik da može biti zanemaren, serijski otpor R_s je unutarnji otpor i on ovisi o materijalu i izradi članka (dubini pn sloja, nečistoćama) i poželjno je da je što manji. U idealnom FN članku $R_s=0$ (nema serijskog gubitka), i $R_p=\infty$ (nema rasipanja prema zemlji). Učinkovitost FN članka je osjetljiva na male promjene R_s , ali nije osjetljiva na promjene R_p . Malo povećanje u serijskom otporu R_s može značajno smanjiti izlazne radne karakteristike [24].



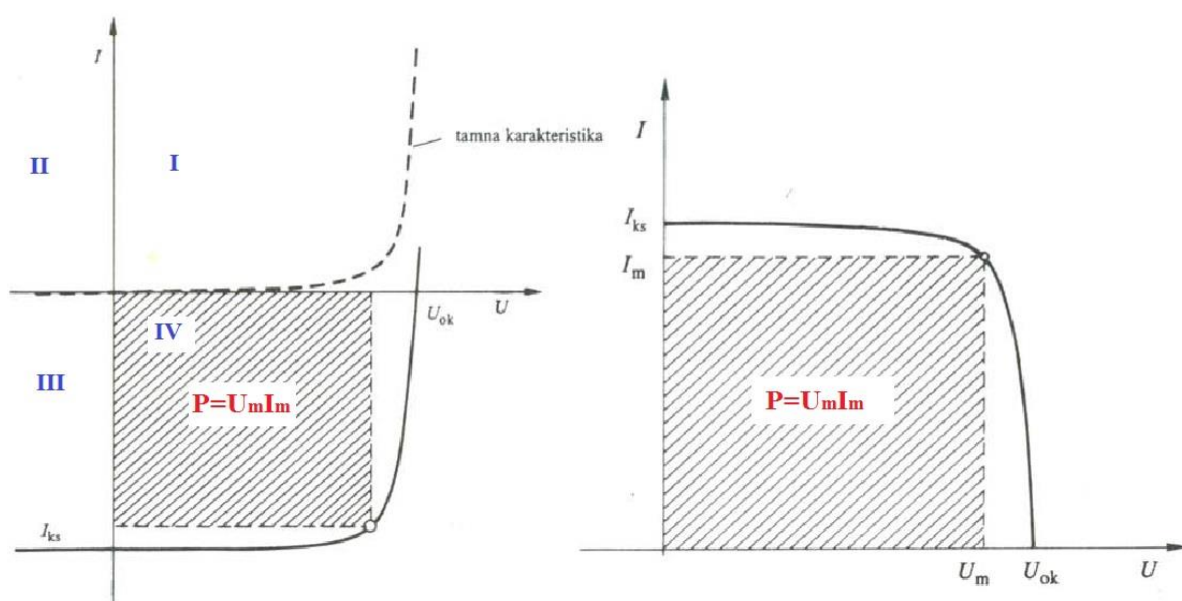
Slika 27. Utjecaj serijskog i paralelnog otpora na U-I karakteristiku

Kada se FN članak spoji u zatvoreni strujni krug i osvijetli, kroz potrošač predstavljen otporom (R) će proteći struja. (5) I je struja koja teče vanjskim trošilom, I_s je struja nastala u članku zbog FN efekta, a I_d struja diode, I_0 struja zasićenja, e elementarni naboj, U vanjski napon, k Boltzmannova konstanta, a T apsolutna temperatura [24].

$$I = I_d - I_s = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_s \quad (5)$$

Najvažniji dio karakteristike FN članka se nalazi u četvrtom kvadrantu, jer je to radno područje članka kada se dobiva električna energija. Zbog toga se obično i crta samo to područje, odnosno četvrti kvadrant, uzimajući vrijednosti struje pozitivnim (6). Površina osjenčanog pravokutnika odgovara maksimalnoj snazi koju FN članak može dati (10) [24].

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (6)$$



Slika 28. U-I karakteristika osvijetljene i neosvijetljene FN članke [24]

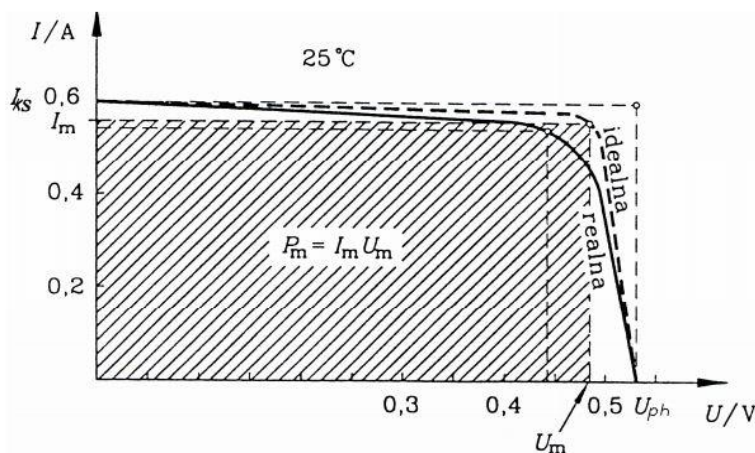
Ostali parametri važni za U-I karakteristiku su napon otvorenog kruga (U_{ok}) kada je $I=0$ i struja kratkog spoja (I_{ks}) kada je $U=0$ prema (7) (8) [1]:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right) \quad (7)$$

$$I_{ks} = I_s \quad (8)$$

Kada uzmemo u obzir postojanje otpora R_p i R_s , dobiva se stvarna jednadžba članka gdje je n faktor idealnosti (za idealni FN članak je parametar $n=1$) prema (9) [1]:

$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{e(U+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (9)$$



Slika 29. U-I karakteristika idealne i realne osvijetljene FN članke [24]

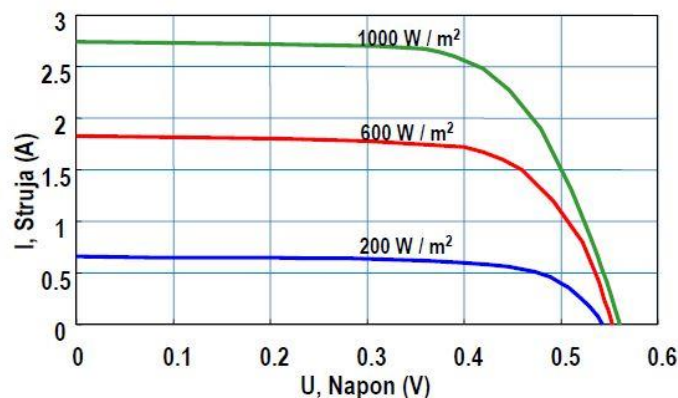
Snaga koju FN članak može dati je umnožak struje i napona (11), a F je faktor punjenja koji pokazuje koliko se stvarni FN članak približava idealnom, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora članka (12). Obično vrijedi da je $0,7 < F < 0,9$ [1]:

$$P_m = I_m U_m \quad (10)$$

$$P = IU = U \left[I_s - I_0 \left(e^{\frac{e(U+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

$$F = \frac{I_m U_m}{I_{ks} U_{ok}} \quad (12)$$

Prema slici 32 vidljivo je da promjena intenziteta ozračenja bitno utiče na U-I karakteristiku članka, jer je struja kratkog spoja gotovo proporcionalna intenzitetu ozračenja dok se napon praznog hoda mijenja po logaritamskoj funkciji. Učinkovitost FN članka je omjer njene maksimalne snage P_m i snage Sunčeva ozračenja P_u koje upada na članak, gdje su E ozračenje, a J_{ks} gustoća struje kratkog spoja (13) [1]:



Slika 30. U-I karakteristika monokristalnog FN članka pri ozračenjima od 200, 600 i 1000 W/m² [26]

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{U_m I_m}{EA} = F \frac{U_{ok} J_{ks}}{E} \quad (13)$$

Da bi učinkovitost članka bila što veća, U_{ok} i J_{ks} bi trebali biti što veći i faktor punjenja što bliže jedinici. Također promjenom temperature, dolazi do promjena raznih značajki članka (struje kratkog spoja, struje zasićenja, ukupne struje članka, napona otvorenog kruga, snage, faktora punjenja) pa time i do promjene učinkovitosti. Promjena fotostruje I_s i struje kratkog spoja je mala i zato zanemariva.

Ovisnost napona otvorenog kruga o temperaturi, pri čemu je nova temperatura T_2 , a početna T_1 . (14) [24]

$$U_{ok}(T_2) = U_{ok}(T_1) \frac{T_1}{T_2} + \frac{E_g}{e} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) - \frac{3k}{e} T_1 \ln \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \quad (14)$$

Ovisnost struje zasićenja o temperaturi (15) [24].

$$I_o(T) = AT^3 e^{\frac{E_g}{kT}} \quad (15)$$

Ovisnost snage FN članka o temperaturi (16) [24].

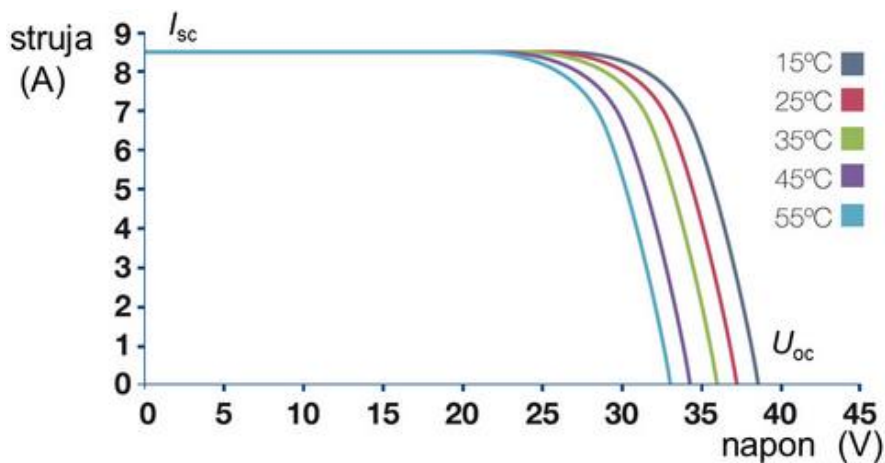
$$P_m(T_2) = P_m(T_1)[1 + \beta(T_2 - T_1)] \quad (16)$$

gdje je β (17) [24].

$$\beta = \frac{dP_m/dT}{P_m} = \frac{d\eta/dT}{\eta} = \frac{1}{T} - \frac{E_g}{eU_m T} - \frac{3k}{eU_m} \quad (17)$$

Ovisnost učinkovitosti o temperaturi (18) [23].

$$\eta(T_2) = \eta(T_1)[1 + \beta(T_2 - T_1)] \quad (18)$$



Slika 31. Ovisnost U-I karakteristike o temperaturi [26]

Učinkovitost koju daju proizvođači FNmodula se daje za temperaturu od 25 °C pri čemu je to temperatura modula, a ne temperatura okoliša. Očigledno je da se pri visokim temperaturama (posebno u ljetnim periodima), učinkovitost FN modula može znatno smanjiti. To smanjenje iznosi oko 0,4-0,5 % za svaki °C veći od 25 °C. Također moramo misliti i o vijeku trajanja FN članaka. Učinkovitost opada s njihovim starenjem. Većina današnjih proizvođača FN modula daje tzv. linearnu garanciju za učinkovitost na 25 godina. To znači da se učinkovitost modula u prvoj godini smanji za oko 2 %, a u narednim godinama opada linearno. Nakon 10 godina se smanji na 90 %, a nakon 25 godina na 80 % [21].



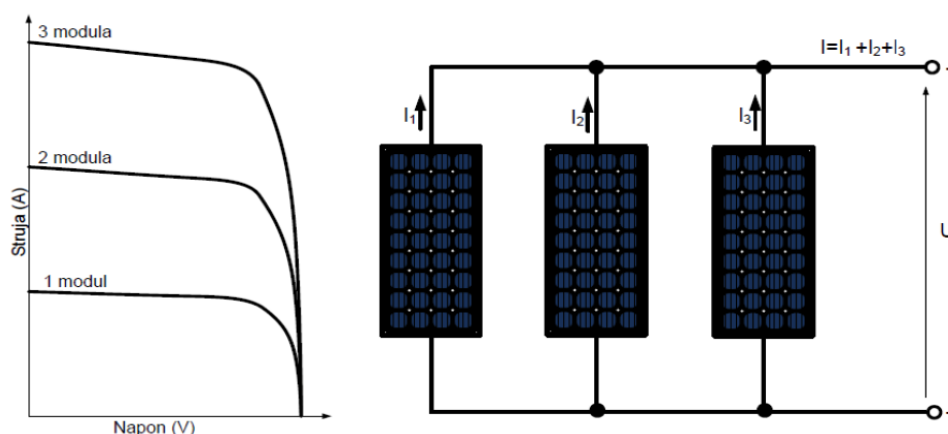
Slika 32. Linearna i standardna garancija na 25 godina za FN modula [21]

3.1.4. Spajanje FN modula u serije i paralele

Električnim povezivanjem FN članaka tijekom proizvodnje nastaju FN moduli od kojih se grade i nadograđuju mali, pouzdani i posve neovisni energetske sustavi. Povezivanje FN članaka može biti izvedeno paralelnim i serijskim spajanjem.

Paralelnim spajanjem dolazi do povećanja jakosti struje (A) s povećanjem površine (m²), a izvodi se tako da se svi (+) polovi spoje na isti vodič, a analogno je i za (-) vodiče. Dakle, ukoliko se od odabranog broja FN članaka želi dobiti najveća moguća struja, onda te članke treba vezati upravo na taj način. Ako je struja jednog članka I_i , a broj članaka n , onda je u idealnom slučaju ukupna struja paralelno vezanih članaka I_{uk} prema (19) [28].

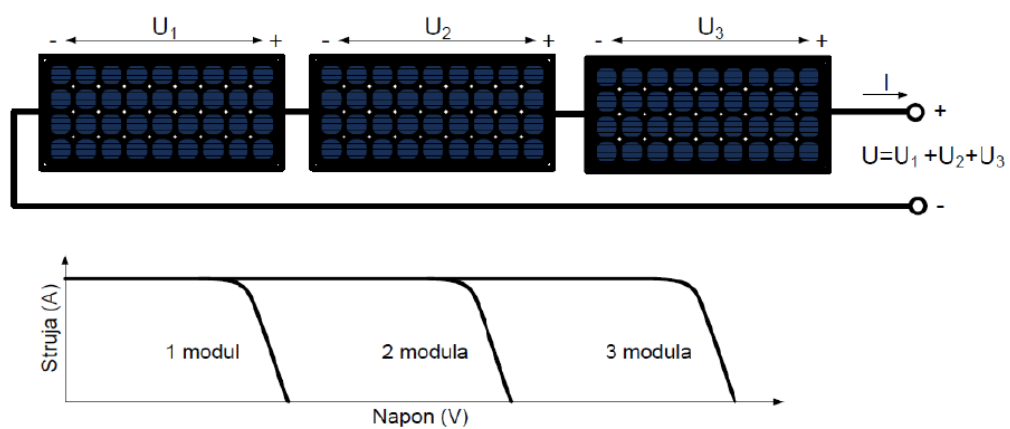
$$I_{uk} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (19)$$



Slika 33. Spajanje FN modula u paralelu [28]

Serijskim spajanjem FN modula dolazi do povećanja napona (V) s povećanjem površine (m²), a izvodi se tako da se naizmjenično spajaju (+) i (-) pol članaka u nizu. Dakle, ako se od odabranog broja članaka želi dobiti što je moguće veći napon, onda ih treba spajati upravo serijski. Struja dobivena serijskom vezom FN članaka je ograničena na struju članka koja je najmanje osvijetljena. Unutarnji otpor članka koji nije osvijetljen raste, a samim time raste i disipacija snage na njemu uslijed čega se članak grije. Povećanjem temperature još više rastu unutrašnji otpor i temperatura te može doći do pojave tzv. vrućih točaka na FN modulu koje ga mogu oštetiti. Ako je napon jednog članka U_i , a broj članaka n , onda je ukupni napon serijski vezanih članaka U_{uk} (20) [20].

$$U_{uk} = \sum_{i=1}^n U_i \quad (20)$$



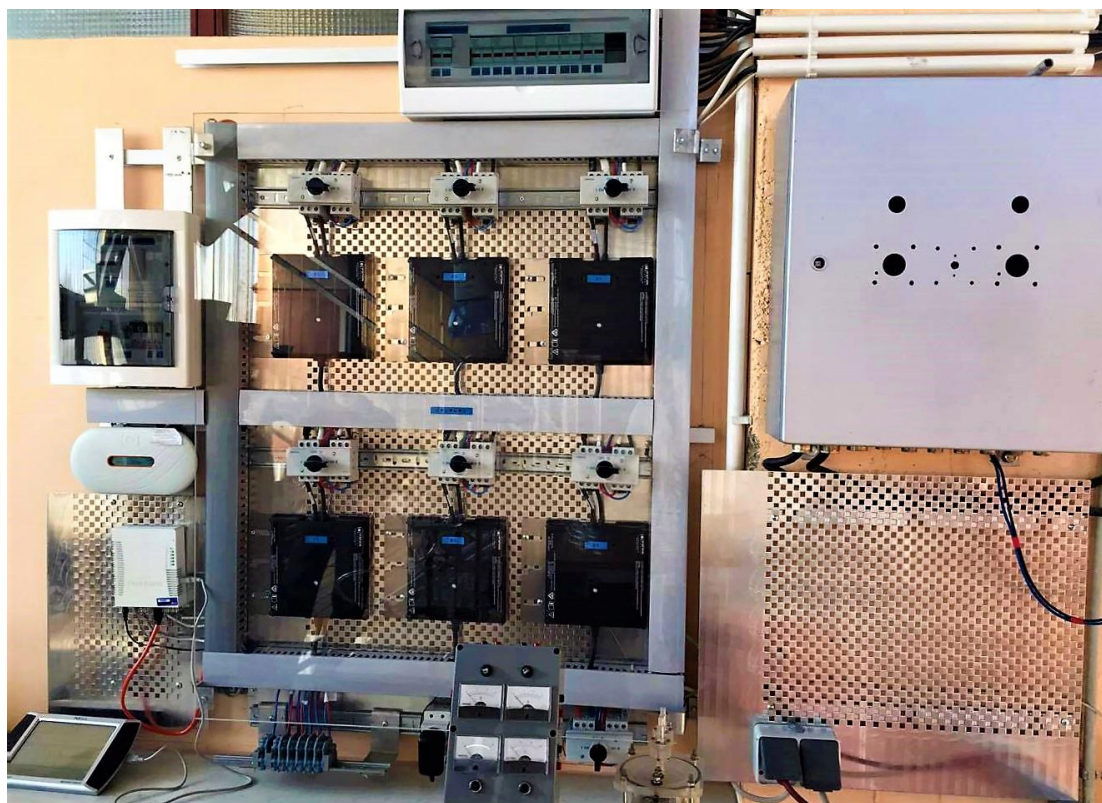
Slika 34. Spajanje FN modula u seriju [28]

4. TEHNIČKI OPIS SUNČANE ELEKTRANE

Na krovu Laboratorija za energetska postrojenja FSB-a instalirana je Sunčana elektrana snage 960 W gdje se dobivena električna energija koristi za proces dobivanja vodika elektrolizom vode, odnosno za pohranu energije. Elektrana se sastoji od tri FN panela na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču, od kojih svaki sadrži dva FN modula. Uz njih na krovu se također nalaze osjetnik za meteorološku stanicu i spojna kutija. Rad Sunčane elektrane prati se preko web sučelja *EnlighterManager* s trajnom pohranom izmjerenih podataka. Unutar Laboratorija se nalazi upravljačka jedinica sa 6 mikropretvarača, AC ormarom i energetskim kablovima, kutijom sa sklopkama, rheostatom, uređajem za prijenos i pohranu podataka, usmjerivačem, bežičnom meteorološkom stanicom i razvodnom kutijom s osiguračima.



Slika 35. FN moduli na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču na krovu Laboratorija za energetska postrojenja



Slika 36. Unutarnja upravljačka jedinica Sunčane elektrane

Svaki FN modul se spaja preko mikropretvarača Enphase M215 na zajednički BUS kabel 220V, te preko AC ormara na distributivnu mrežu. Prije spajanja na mikropretvarač, pozitivni i negativni kabel vode se iz spojne kutije preko tropoložajne sklopke nazad na pretvarač, čime se dobiva mogućnost prespajanja struje FN modula na željeni reostat, ovisno o uvidu u stanje proizvodnje energije pojedinog modula.

Uvid u to stanje pojedinog modula vrši se preko uređaja Enphase Gateway, koji ostvaruje komunikaciju s mikropretvaračima VF vezom preko distributivne mreže 230V. Ovime se dobiva operativna mogućnost izbora najpovoljnije trenutne proizvodnje nekog modula i napajanje željenog trošila (rheostata).

4.1. FN moduli

4.1.1. FN moduli na fiksnom nosaču

FN moduli na fiksnom nosaču su postavljeni na nosivu čeličnu konstrukciju pod optimalnim kutom za hvatanje Sunčeve energije tokom cijele godine, koji se više ne mijenja. Budući da zemljopisni položaj, vremenski uvjeti te kontinentalna klima ne pružaju idealne uvjete za korištenje Sunčeve energije na području središnje Hrvatske, grad Zagreb ne spada u vrh raspoloživog Sunčevog potencijala u Hrvatskoj, ali je svejedno pogodan. Prosječno godišnje osunčanje mu iznosi oko $1,25 \text{ MWh/m}^2$ godišnje, dok je prosječan broj Sunčanih sati 1805 [21].

ZAGREB Zemljopisna širina [N]: 45°19' Zemljopisna dužina [E]: 16°2'			
Mjesec	Globalno sunčevo zračenje na okomitu plohu (kWh/m^2 dnevno)	Srednje mjesečne temperature zraka ($^{\circ}\text{C}$)	Mjesečni optimalni kut ($^{\circ}$)
Siječanj	1.390	-0.8	58.35
Veljača	2.330	1.9	51.94
Ožujak	3.400	5.9	40.23
Travanj	4.230	10.6	23.19
Svibanj	5.430	15.3	8.53
Lipanj	5.810	18.5	1.61
Srpanj	6.080	20.1	5.04
Kolovoz	5.260	19.3	17.59
Rujan	3.800	15.8	36.36
Listopad	2.330	10.5	49.89
Studen	1.350	5.3	56.57
Prosinac	1.100	0.9	57.67
Prosječno	3.550	10.3	Godišnji optimalni kut: 24.95°

Tablica 2. Raspoloživost Sunčevog potencijala za grad Zagreb [21]

Instalirani FN panel tvrtke Suntech se sastoji od dva FN modula STP160S-24/Ac od kojih svaki u šest redova sadrži 12 monokristalnih Si članaka. Postavljen je na kut od 45° iako to nije kao što to vidimo po Tablici 2 optimalan kut, nije toliko veliko odstupanje za veliku razliku u rezultatima. Za njega se pretpostavlja da će proizvesti najmanje energije. Svaki modul je snage 160W, što znači da je FN panel snage od 320W. Fiksni nosač je najjeftiniji i najjednostavniji za ugradnju od ostalih dvoje nosača u Sunčevoj elektrani, ali je zato pitanje koji je dugoročno najisplativiji.



Slika 37. FN moduli na fiksnom nosaču

Tablica 3. Značajke FN modula STP160S-24/Ac pri standardnim uvjetima ($T_c = 25^\circ\text{C}$, $E = 1000 \text{ W/m}^2$)**KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE**

Vrsta članka	Monokristalni silicij
Broj članaka	72
Masa modula	15,5 kg
Dimenzije modula	1580 mm x 808 mm x 35 mm

ELEKTRIČNE ZNAČAJKE

Optimalan radni napon (U_m)	35 V
Optimalna radna struja (I_m)	4,58 A
Napon otvorenog kruga (U_{ok})	43,2 V
Struja kratkog spoja (I_{ks})	5 A
Maksimalna snaga (P_m)	160 W
Učinkovitost modula (η)	12,5 %
Radna temperatura modula	$45^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
Maksimalni napon sustava	1000 V
Faktor punjenja	74,1 %

**Slika 38. Suntech deklaracija FN modula**

4.1.2. FN moduli na jednoosnom nosaču

FN moduli na jednoosnom nosaču (engl. single axis solar tracker - SAT) imaju jedan stupanj slobode gibanja koji se ponaša kao os rotacije, koja je obično usklađena uzduž pravog sjevernog meridijana. Ovaj FN panel je također tvrtke Suntech i sastoji se od dva FN modula STP160S-24/Ac od kojih svaki u šest redova sadrži 12 monokristalnih Si članaka, sveukupne snage 320W. Sve značajke modula su navedene prethodnom tablicom. Dakle, jedina razlika je u gibanju jednoosnog nosača u smjeru istok-zapad po čemu je pretpostavka da će proizvedena energija FN modula s ovako konstruiranim nosačem biti veća od onog s fiksnim.

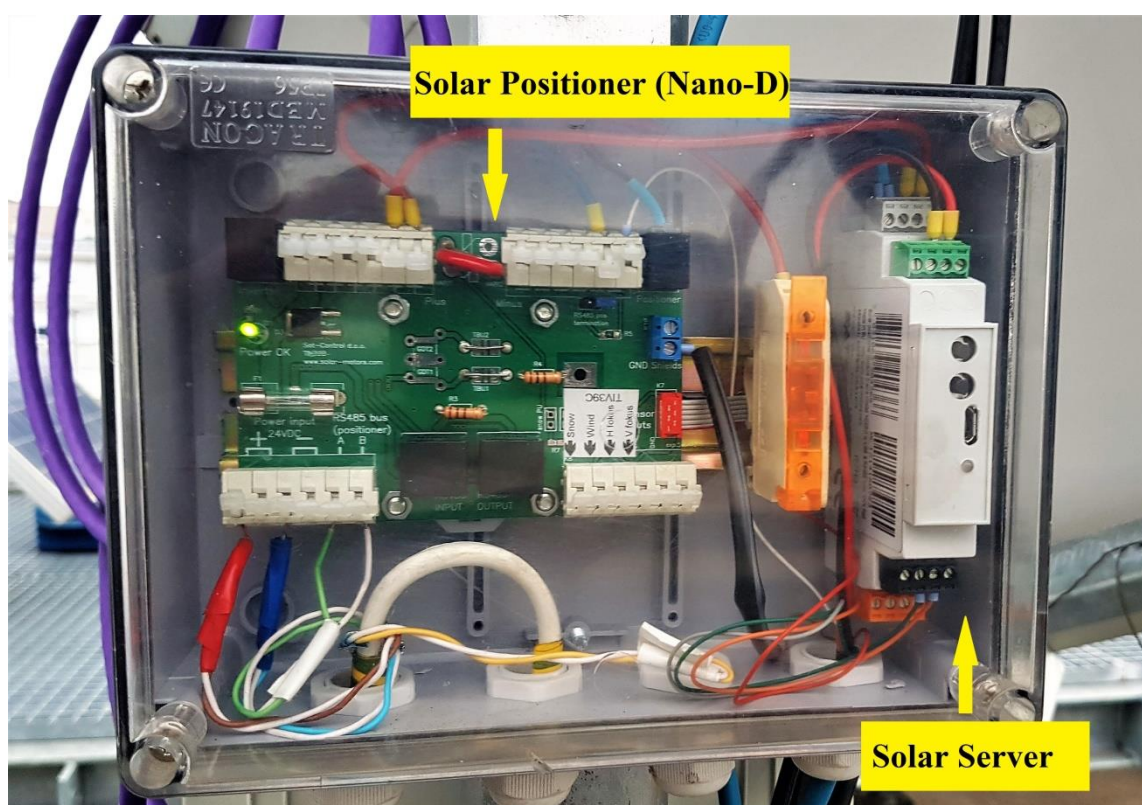


Slika 39. FN moduli na jednoosnom nosaču

FN panel se okreće oko jedne osi pomoću SM40M2V2P modela elektromotora tvrtke SATControl koji je spojen na upravljačku kutiju u kojoj su dijelovi bitni za regulaciju pozicioniranja sustava, kao što je to solarni server (Solar Server) i matična ploča (Solar positioner).



Slika 40. Značajke SATControl (Hour single axis motor) elektromotora jednoosnog nosača



Slika 41. Upravljačka jedinica jednoosnog nosača

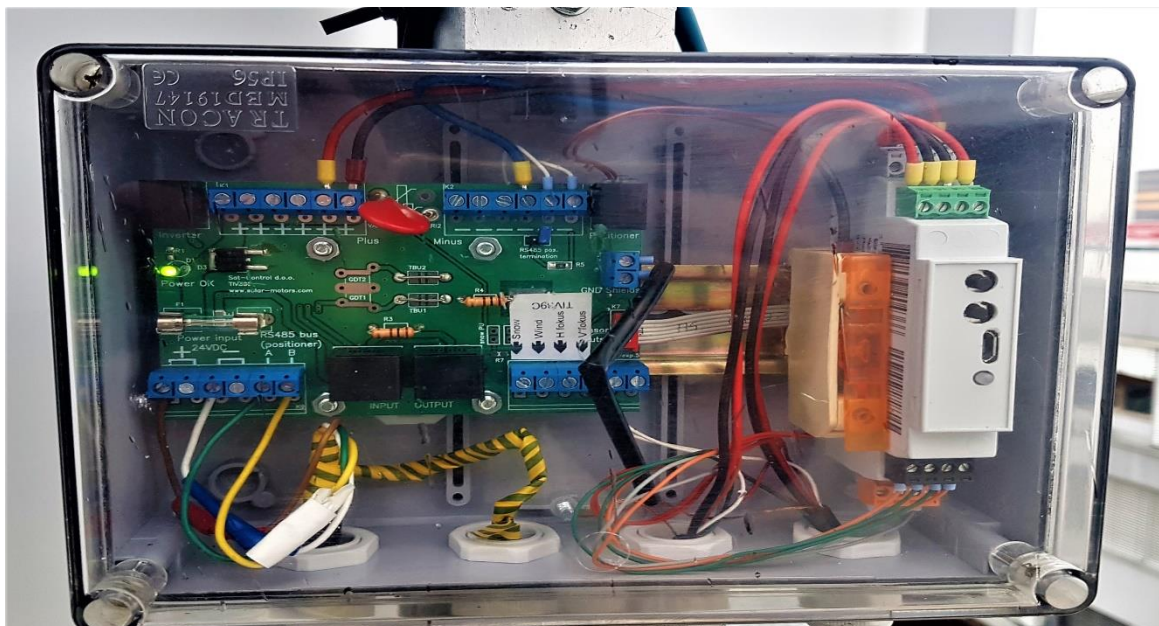
4.1.3. FN moduli na dvoosnom nosaču

FN moduli na dvoosnom nosaču (engl. dual axis solar tracker) imaju dva stupnja slobode gibanja koji se ponašaju kao osi rotacije. Te osi su okomite jedna na drugu. Os koja je fiksirana s obzirom na tlo može se zvati primarna os, a os koja je u odnosu s primarnom naziva se sekundarnom. Kako ovaj FN panel STP160S-24/Ac ima jednake značajke kao i prethodna dva, pretpostavka je da će uz jednu dodatnu os rotacije, najviše proizvesti energije. Dvoosni nosač (Solar Tracker 2-axis ST44M2V2P) je proizvela također tvrtka SATControl.



Slika 42. FN moduli na dvoosnom nosaču

Kako bi se okretao oko dvije rotacijske osi, nosač ima ugrađena dva SATControl elektromotora koja su spojena na upravljaču jedinicu iste organizacijske strukture sustava za praćenje prividnog kretanja Sunca kao i kod jednoosnog nosača.



Slika 43. Upravljačka jedinica FN modula na dvoosnom nosaču



Slika 44. Značajke SATControl (*Elevation angle axis motor*) elektromotora FN modula na dvoosnom nosaču

4.2. Ostali uređaji Sunčane elektrane

Svaki FN modul je spojen na jedan mikropretvarač (Utility-Interactive Inverter) tvrtke EnphaseEnergy koji se nalaze u Laboratoriju za energetska postrojenja. Oni su označeni kao F1 i F2, J1 i J2, D2 i D2 te svaki ima svoj prekidač kako bi se mogao isključiti iz sustava. Iznad njih se nalazi ormar sa sklopkama istih oznaka iz kojega se vode pozitivni i negativni kablovi od spojne kutije do mikropretvarača koji zatim pretvaraju dobivenu istosmjernu struju, niskog napona u kompatibilnu izmjeničnu struju. Maksimalni ulazni napon im je 48 V, a struja 10,5 A.



Slika 45. Mikropretvarači i ormar s osiguračima

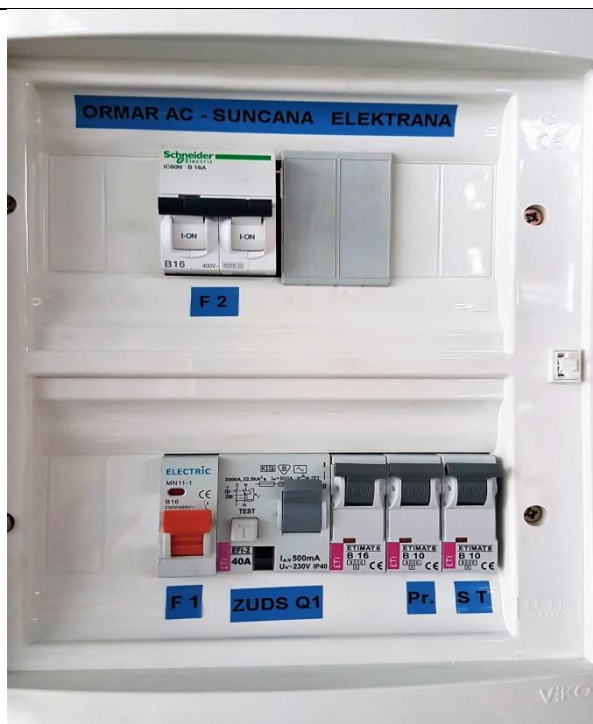


Slika 46. Ormar s osiguračima

Također od tvrtke EnphaseEnergy instaliran je i komunikacijski uređaj Enphase Gateway koji omogućava spajanje na njihovo web sučelje gdje se trajno pohranjuju izmjereni podaci. Iznad njega se nalazi razvodni ormar AC sa zaštitnim elementima, a ispod usmjerivač.



Slika 47. Komunikacijski uređaj Enphase Gateway



Slika 48. Razvodni ormar AC

Kako bi se moglo pratiti različite klimatske parametre instalirana je i meteorološka stanica s USB priključkom i zaslonom osjetljivim na dodir, koja je bežično spojena na vanjski osjetnik.

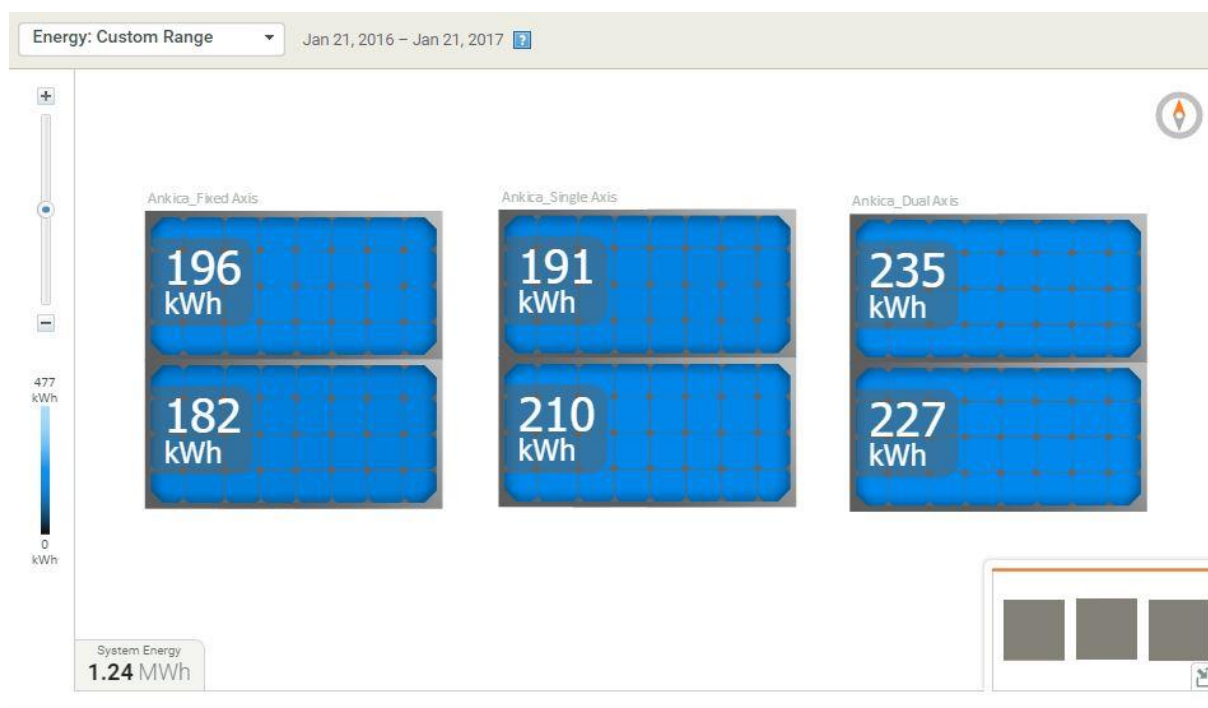


Slika 49. Meteorološka stanica s osjetnikom

5. USPOREDBA PROIZVEDENE ENERGIJE FN MODULA NA FIKSOM, JEDNOOSNOM I DVOOSNOM NOSAČU

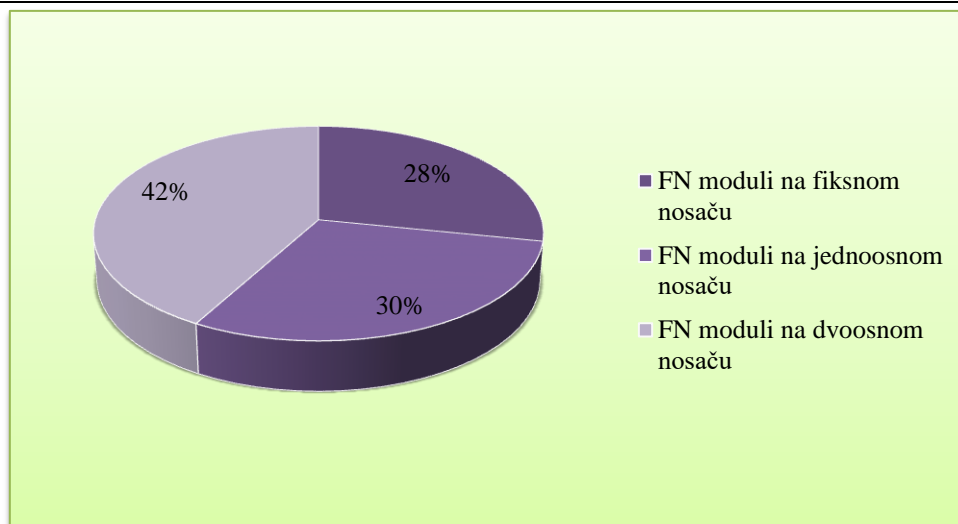
5.1. Sunčana elektrana

U ovom odjeljku je analiziran rad Sunčane elektrane u cjelini sa sva tri FN panela na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču. Svi podaci korišteni u radu su prikupljeni i spremljeni u raznim oblicima na stranici <https://enlighten.enphaseenergy.com> pomoću Enphase mikropretvarača i komunikacijskog uređaja. Preko web sučelja se prati rad Sunčane elektrane od 21. Siječnja 2016. godine, što omogućava bazu podataka unutar jedne godine. Dakle parametri Sunčane elektrane u cjelini kao i njenih pojedinačnih FN modula, su obrađeni u razdoblju od 21. siječnja 2016. do 21. siječnja 2017. godine. Dobivena energija se dalje koristi za proces dobivanja vodika elektrolizom vode. Na web sučelju je prikaz 6 FN modula, od kojih su u prvom stupcu dva modula na fiksnom nosaču, drugi stupac predstavlja module na jednoosnom nosaču, a zadnji module na dvoosnom nosaču.



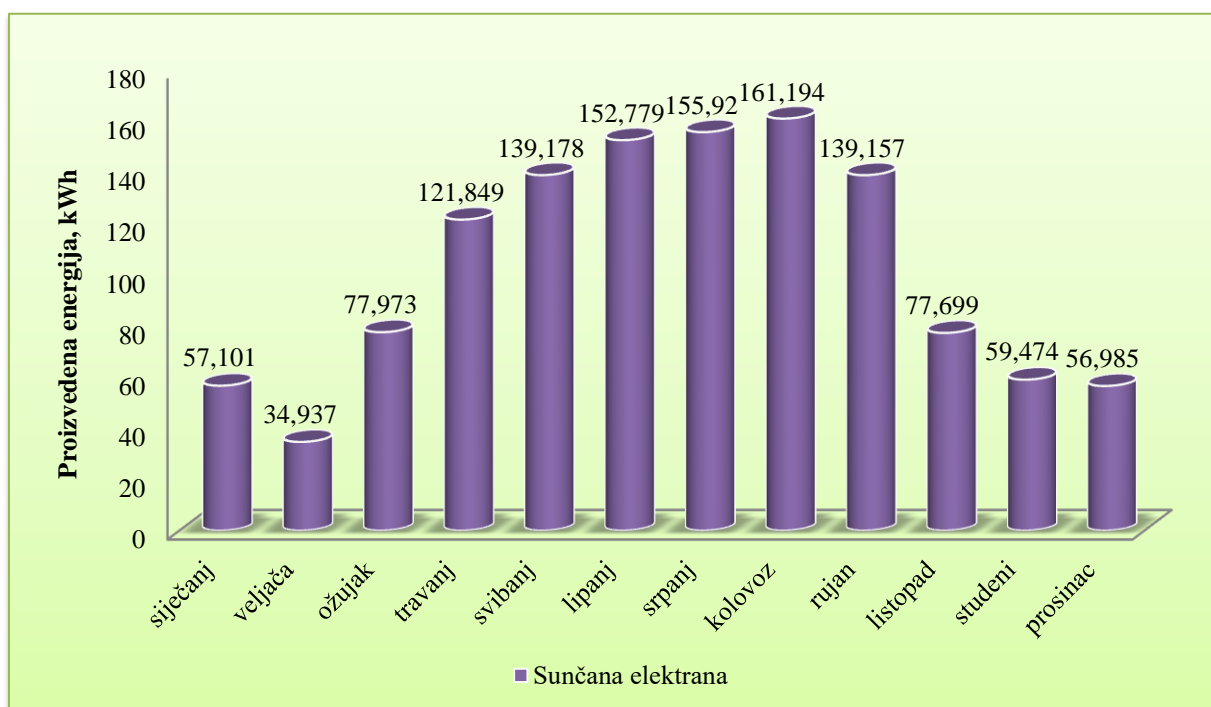
Slika 50. Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije na web sučelju

Sunčana elektrana je u navedenom razdoblju od jedne godine proizvela sveukupno 1,24 MWh energije, od koje su FN moduli na fiksnom nosaču proizveli 378 kWh, oni na jednoosnom 401 kWh, a na dvoosnom 462 kWh.



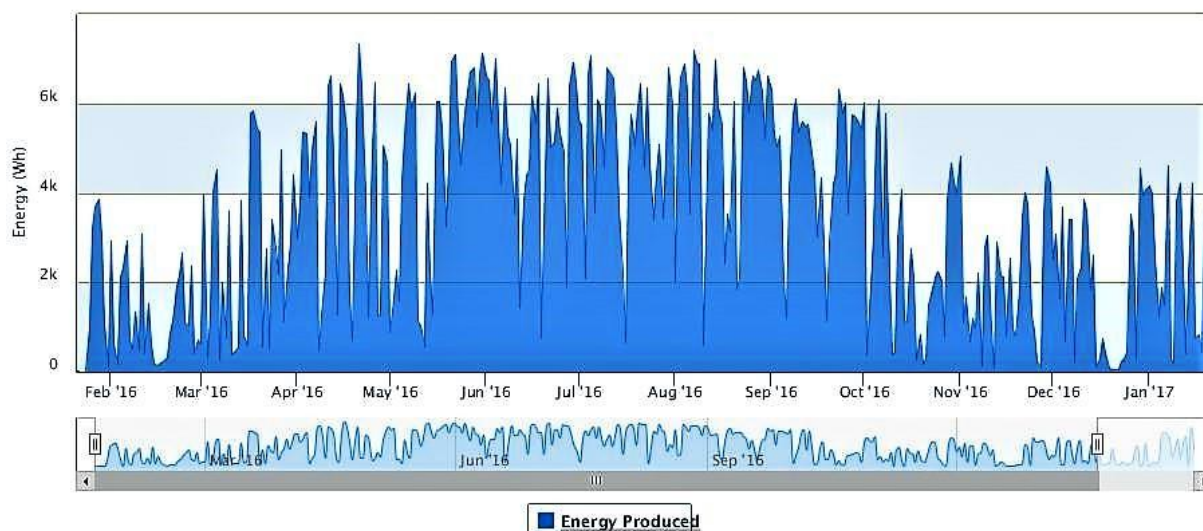
Slika 51. Udio proizvedene energije različitih FN panela unutar razdoblja od jedne godine

Već na početku analize podataka je vidljivo da najveći postotak u ukupno proizvedenoj energiji imaju FN moduli na dvoosnom nosaču, a najmanji moduli na fiksnom nosaču. Razlika u njihovoj proizvedenoj energiji ipak nije toliko velika da bi mogli zaključiti apsolutnu isplativost ulaganja u najučinkovitije nosače, ali kako je to razdoblje od jedne godine, pretpostavlja se da se njihov udio u proizvedenoj energiji dugoročno povećava.



Slika 52. Mjesečna proizvodnja energije Sunčane elektrane u kWh

Prema dijagramu za mjesečnu proizvodnju, vidljivo je da je najproduktivniji mjesec bio kolovoz 2016. godine sa 161,194 kWh energije, što malo odstupa od srpnja iste godine. Najmanje energije u iznosu od 34,937 kWh je proizvedeno u veljači 2016. godine koja je imala uvjerljivo najlošije vremenske prilike u godini.



Slika 53. Dijagram ukupne proizvodnje energije s web sučelja EnlightenManager



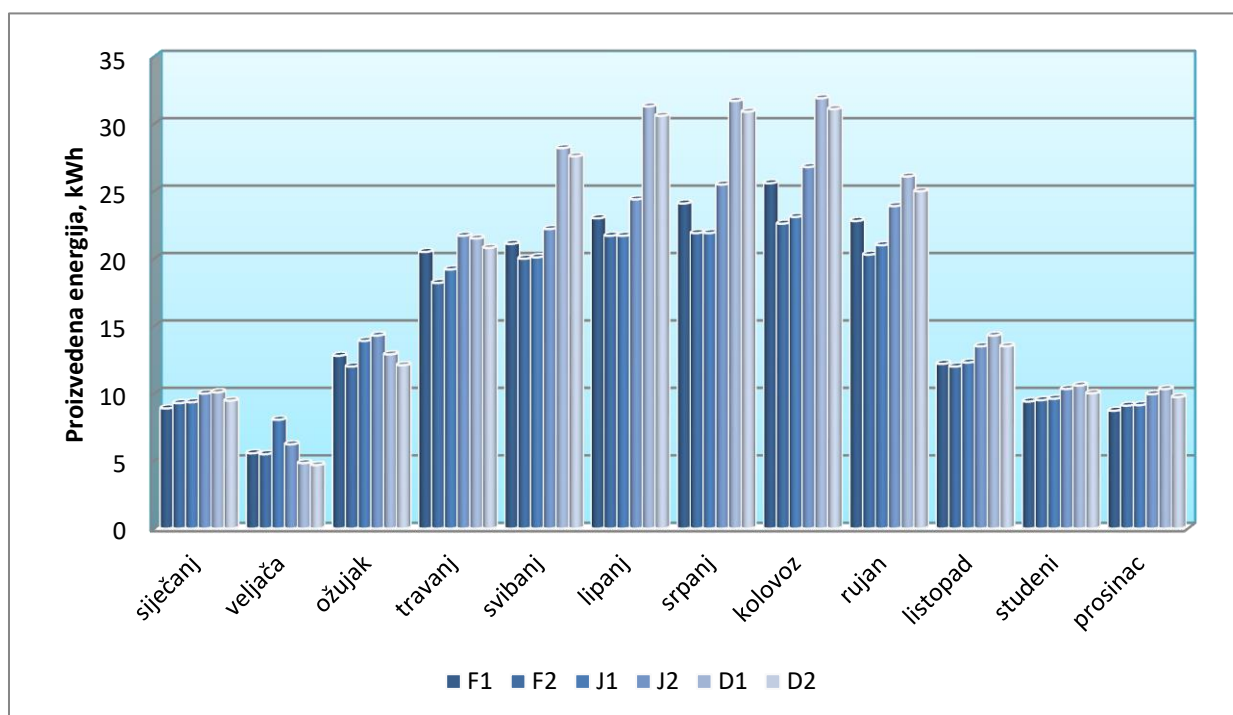
Slika 54. Usporedba ukupno dobivene energije

Preko navedenog sučelja vidljivo je da bi se s proizvedenom električnom energijom moglo napajati 122 kuće i koliki je tada doprinos smanjenu emisija CO₂ korištenjem obnovljivog izvora energije.

5.2. Usporedba FN modula

5.2.1. Godišnja proizvodnja energije FN modula

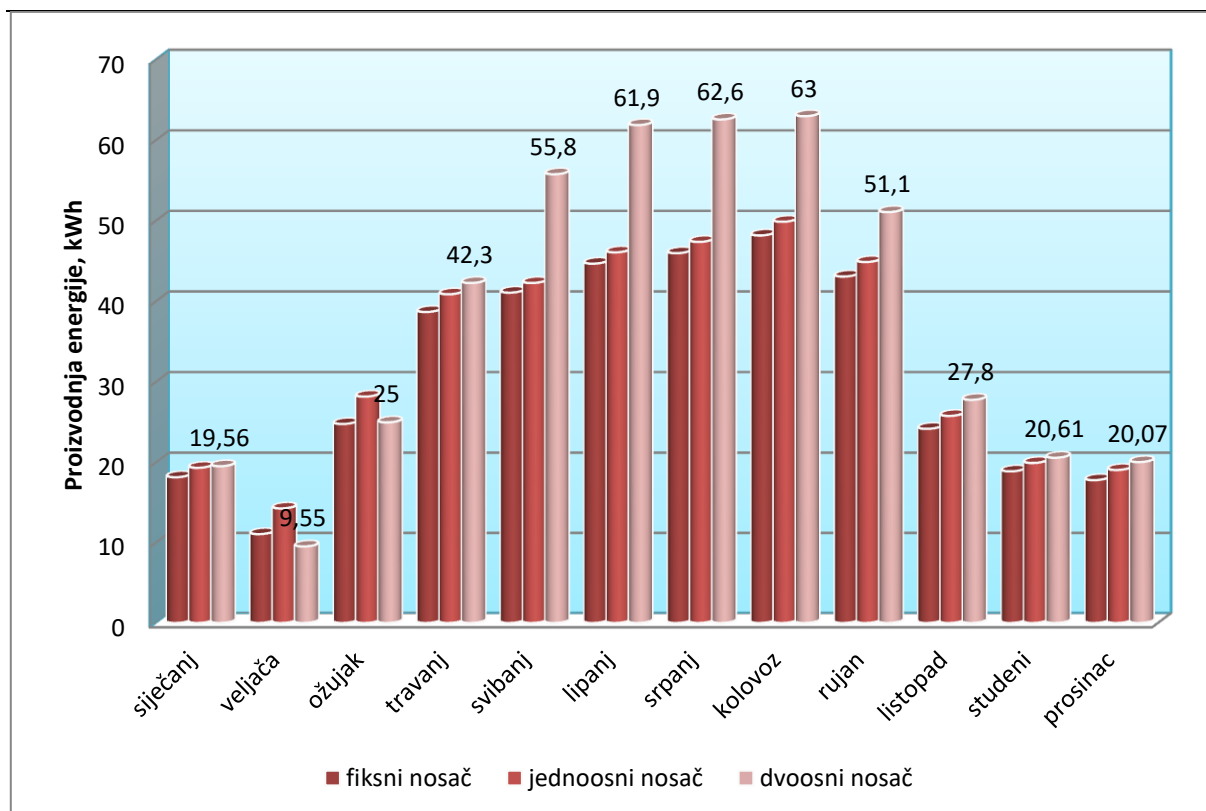
Pomoću prikupljenih podataka za svih 6 FN modula u različitim godišnjim dobima, napravljena je usporedba njihove proizvodnje energije i postignutih maksimuma u istim mjesecima. Na temelju takve analize donosi se zaključak o učinkovitosti fiksnog, jednoosnog i dvoosnog nosača.



Slika 55. Usporedba proizvodnje svakog FN modula u kWh na godišnjoj razini

Na slici 55 su oznake modula na fiksnom nosaču F1 i F2, na jednoosnom J1 i J2 i na dvoosnom D1 i D2. Očito je da moduli na dvoosnom nosaču proizvedu najviše energije, s time da je između ta dva modula razlika gotovo zanemariva. Najveća razlika između modula na istom nosaču se očituje kod fiksnog i to u ljetnim mjesecima.

Kada se zbroji proizvedena energija modula na svakom nosaču, dobije se dijagram prikazan na slici 56, na kojemu se može vidjeti da razlika u dobivenoj energiji ipak nije toliko značajna. U zimskim mjesecima je kao što je i očekivano najmanja proizvodnja kod sva tri FN panela sa zanemarivom međusobnom razlikom, dok je u ljetnim mjesecima proizvedeno najviše energije na fiksnom i dvoosnom nosaču s maksimalno proizvedenom energijom od 56,7 kWh u kolovozu.

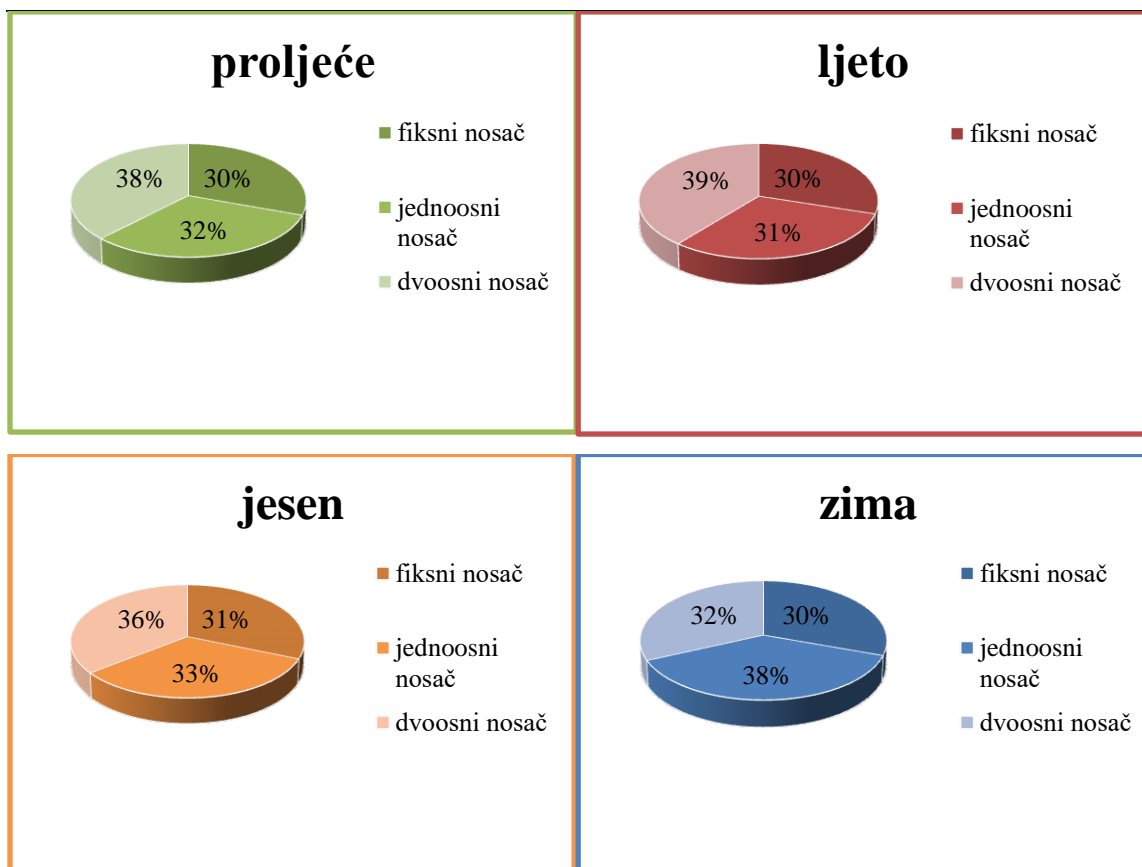


Slika 56. Usporedba proizvodnje svakog FN panela u kWh na godišnjoj razini

5.2.2. Mjesečna proizvodnja energije FN modula

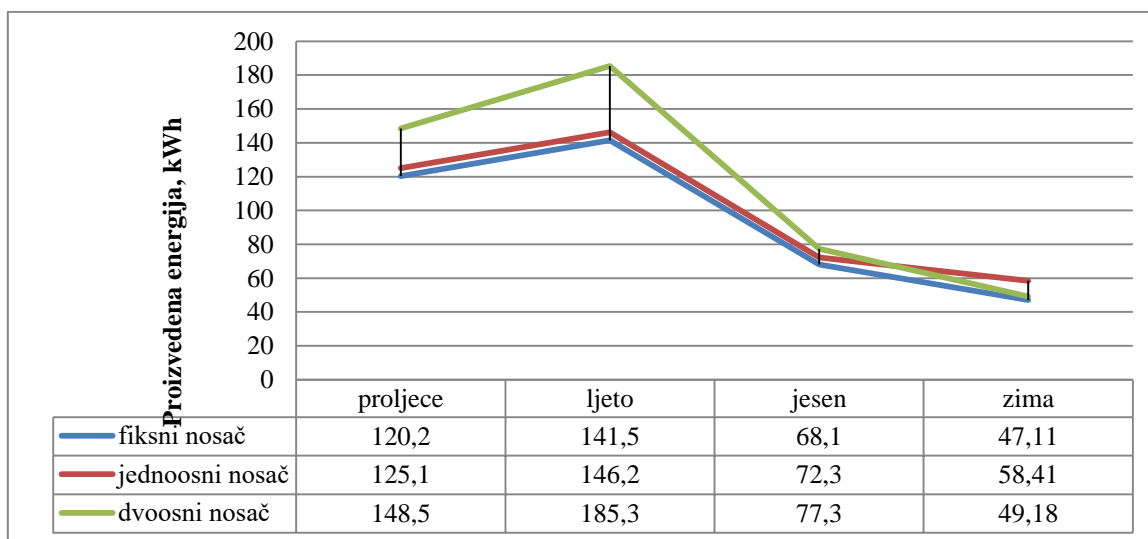
Kao što je to bilo vidljivo iz godišnje analize, svi FN moduli imaju svoj određeni maksimum i minimum proizvodnje energije u istim godišnjim dobima. Najveći razlog tome je različito kretanje Sunca i njegov položaj ovisno o sezoni. Sunce izlazi točno na istoku i zalazi točno na zapadu samo dva dana u godini (prvi dan proljeća i prvi dan jeseni), a izlazi na sjeveroistoku i zalazi na sjeverozapadu tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci. S druge strane, tijekom jesenskih i zimskih mjeseci, Sunce izlazi na jugoistoku i zalazi na jugozapadu. Zenitni položaj Sunca je bliži obzoru tijekom zimskih mjeseci, a viši na nebu tijekom ljetnih mjeseci. Također je od značajne važnosti što Sunce izlazi ranije i zalazi kasnije tijekom ljetnih mjeseci, dok je upravo obrnuto za zimske mjesec [23].

Prema dijagramu je vidljivo da je najviše proizvedene energije bilo u ljetnim mjesecima (473 kWh), dok je najmanje u zimskim (154,7 kWh). Kada se usporede kroz sva godišnja doba paneli na jednoosnom i fiksnom nosačem, uočava se mala razlika u proizvodnji energije od svega 5 %, dok je između najučinkovitijeg dvoosnog i najneučinkovitijeg fiksnog, razlika 13 %. Ta razlika se najviše očituje u sredini ljeta, nakon čega postupno pada do zime, kada radna karakteristika jednoosnog nosača premašuje radnu karakteristike dvoosnog.



Slika 57. Usporedba udjela proizvedene energije FN panela po godišnjim dobima

FN panel na dvoosnom nosaču daje najviše energije u svim godišnjim dobima osim zime, kada ulogu najučinkovitijeg FN panela preuzimaju moduli na jednoosnom nosaču. Moduli na fiksnom nosaču proizvode uvijek najmanje energije, ali razlika u proizvodnji između njega i ostalih nosača tijekom jeseni i zime je poprilično mala.



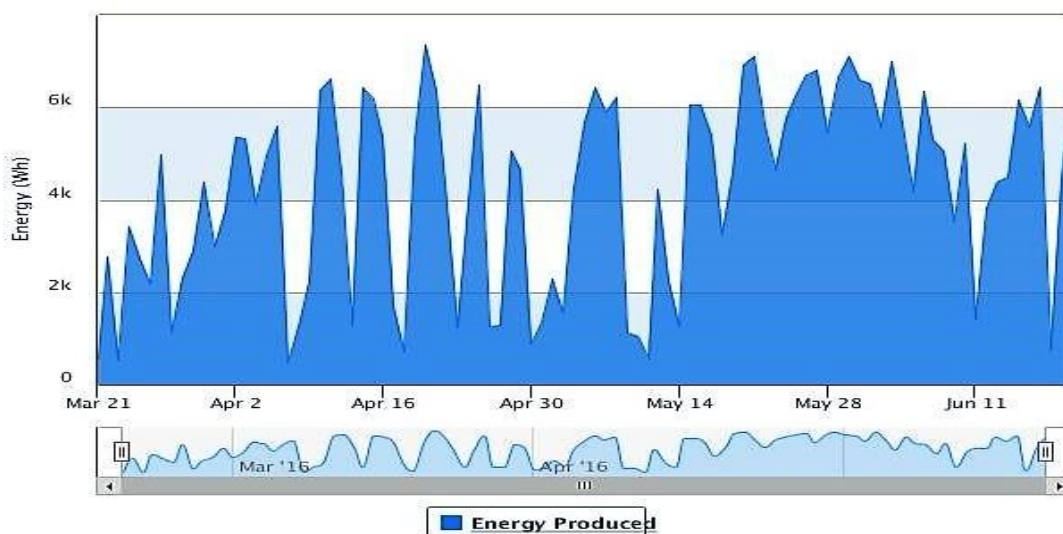
Slika 58. Usporedba proizvedene energije FN panela po godišnjim dobima

5.2.2.1. *Proizvodnja energije tijekom proljeća (21. ožujka 2016. - 21. lipnja 2016. godine.)*



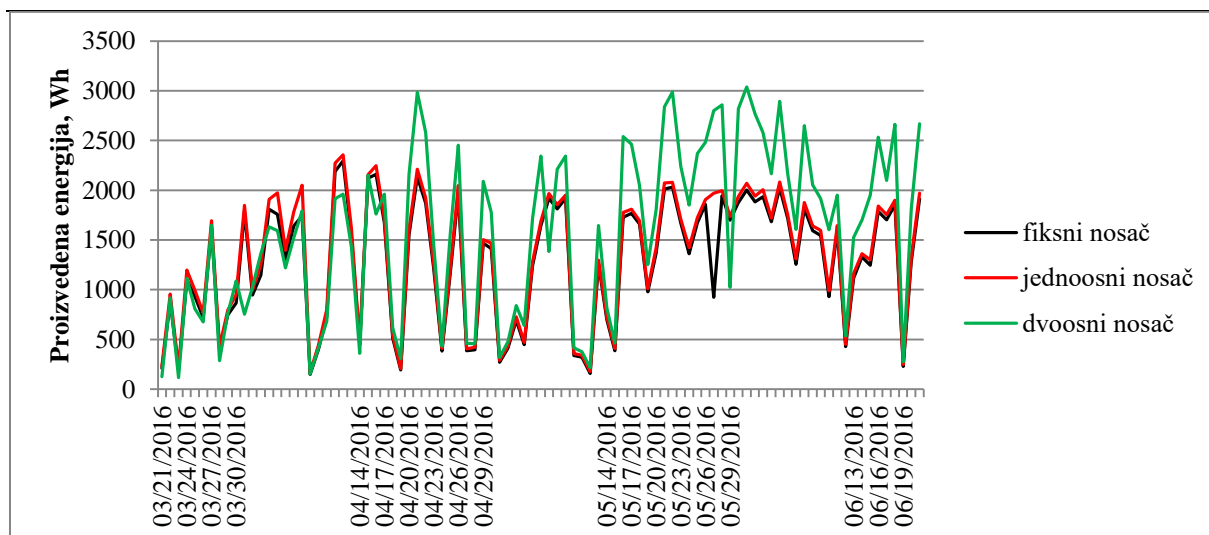
Slika 59. Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije na web sučelju tijekom proljeća

Kao primjer jednog godišnjeg doba je uzeto proljeće kod kojega se očekuje da će, nakon ljeta, FN moduli proizvesti najviše energije. Sveukupna energija proizvedena u Sunčevoj elektrani tijekom proljeća iznosi 394 kWh, s time da najviše energije dolazi od FN panela na dvoosnom nosaču (148,5 kWh), zatim od FN panela na jednoosnom nosaču (125,1 kWh) i na kraju od onog na fiksnom nosaču u iznosu od 120,2 kWh.



Slika 60. Dijagram ukupne proizvodnje energije tijekom proljeća s web sučelja

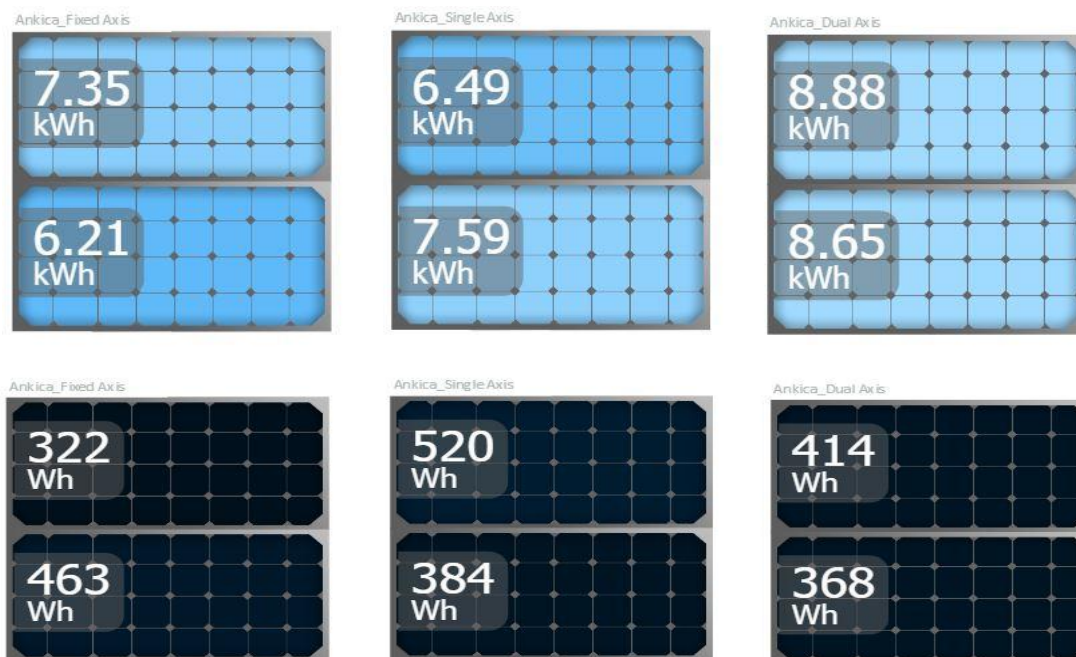
Maksimum proizvodnje energije FN panela na fiksnom nosaču iznosi 2,299 kWh i postignut je 12.4.2016. FN modul na jednoosnom nosaču je postignuo svoj maksimum također 12.4.2016. koji iznosi više od prethodnog (2,360 kWh), dok je na dvoosnom nosaču postignut najviši maksimum od 3,040 kWh datuma 31.5.2016. Najviše energije u Sunčevoj elektrani se proizvelo 21.4.2016. i iznosilo je 7,334 kWh.



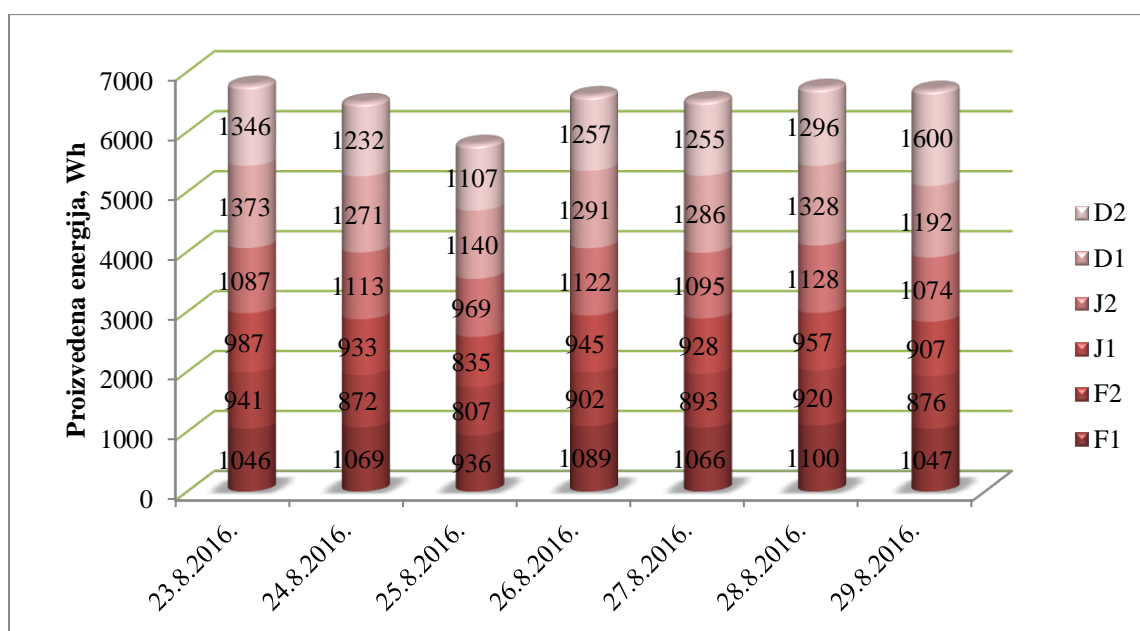
Slika 61. Dijagram proizvodnje energije svakog FN panela tijekom proljeća

5.2.3. Tjedna proizvodnja energije FN modula

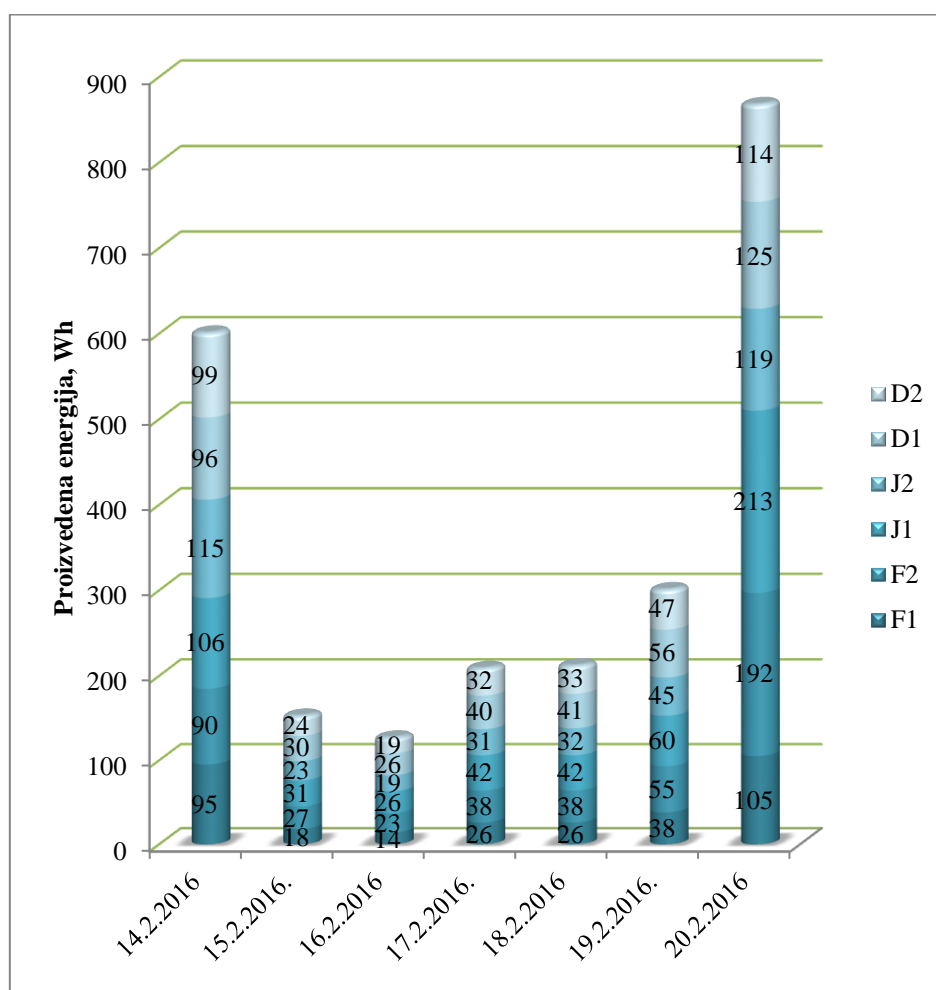
Kao što se može vidjeti u prethodnim analizama, u mjesecu kolovozu je Sunčeva elektrana proizvela najviše energije (161 kWh), a u veljači najmanje (34,9 kWh). Kada se ta dva mjeseca prouče na tjednoj razini, rezultat kaže da je najproduktivniji tjedan Sunčane elektrane od 23. kolovoza 2016. do 29. kolovoza 2016. godine sa 45,2 kWh, a najneproduktivniji od 14. veljače 2016. do 20. veljače 2016. godine sa 2,47 kWh.



Slika 62. Prikaz FN modula i njihove proizvedene energije u najproduktivnijem (gore) i najneproduktivnijem (dolje) tjednu

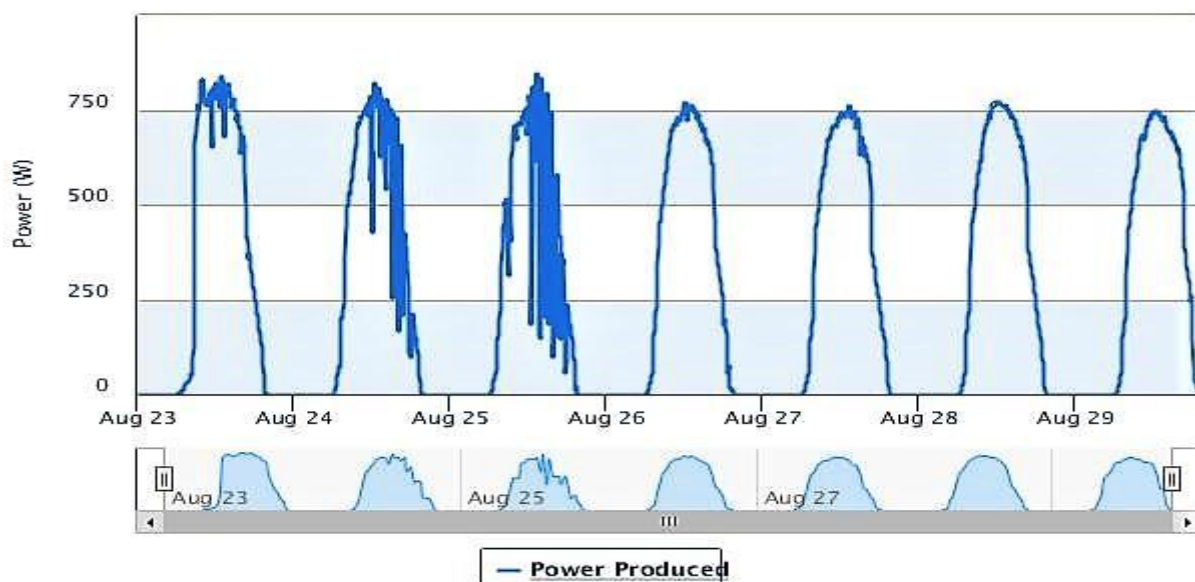


Slika 63. Iznos proizvedene energije svakog FN modula u najproduktivnijem tjednu



Slika 64. Iznos proizvedene energije svakog FN modula u najneproduktivnijem tjednu

Tjedan kada je proizvedeno najviše energije je imao gotovo svaki dan sunčan, bez naoblake, dok je sredinom drugoga tjedna svaki dan bio obilježen oborinama i velikom naoblakom, što je jasno vidljivo u dijagramu.

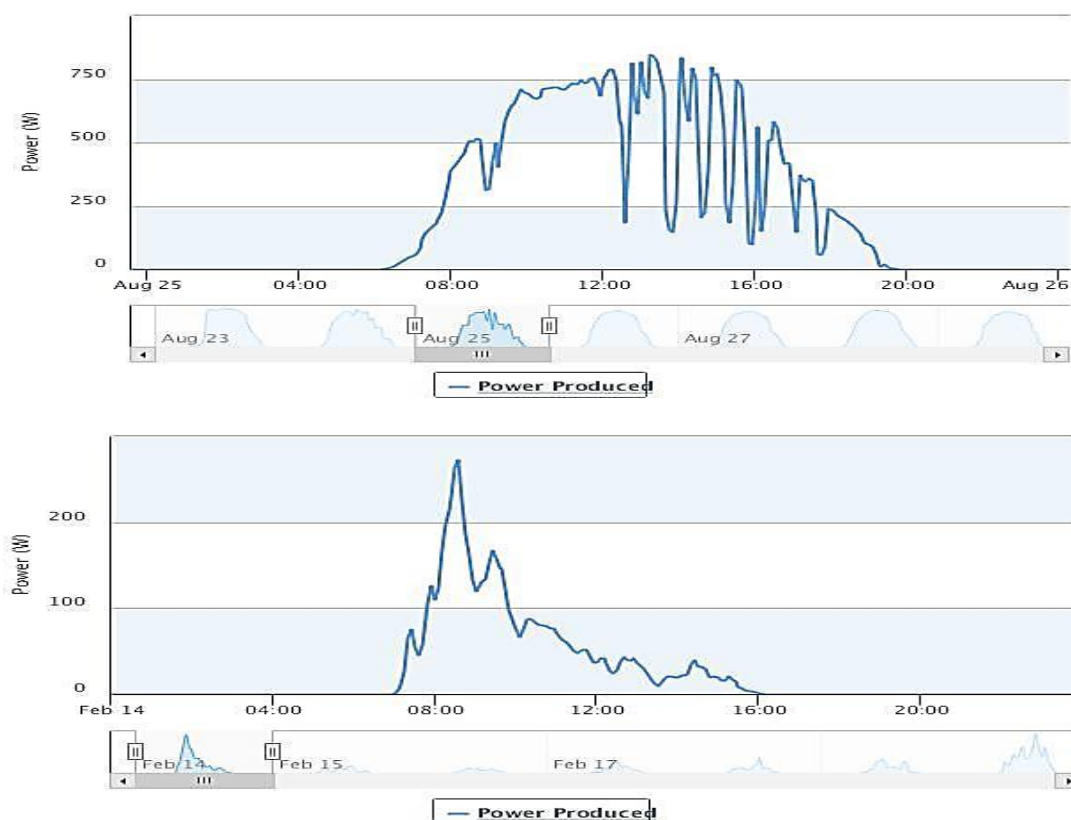


Slika 65. Aktivna snaga svih FN panela najproduktivnijeg tjedna



Slika 66. Aktivna snaga svih FN panela najneproduktivnijeg tjedna

Na dijagramima su prikazane ukupne aktivne snage svake svih FN panela tijekom navedenih tjedna. Jasno je vidljivo da u oba dijagrama FN moduli postižu maksimum sredinom dana, odnosno tijekom podneva kada je Sunce na najvišoj točki. U dobro osunčanom tjednu relativno visoke vrijednosti snage zadržavaju se neko vrijeme nakon čega polagano postupno padaju krajem dana, odnosno polagano se penju do vršne vrijednosti od početka svakog dana. Najveća snaga je dosegnuta 25. kolovoza 2016. godine u 13h i 15min te iznosi 844 W. Na učinkovitost FN modula utječe temperatura čije povišenje iznad određene vrijednosti smanjuje učinkovitost i vjetar koji posljedično smanjuje temperaturu modula te im na taj način povećava proizvodnju. Najveća dosegnuta snaga u vrlo malo osunčanom tjednu iznosi 272 W što je čak 68 % manje od maksimalne snage drugog tjedna. Ta je snaga postignuta u 14. veljače 2016. godine u 8h i 35min po čemu se može vidjeti da je cijeli taj dan bio poprilično oblačan.



Slika 67. Aktivna snaga svih FN panela dana 25. kolovoza 2016. (gore) i 14. veljače 2016. (dolje)

6. USPOREDBA EKSPERIMENTALNO DOBIVENIH REZULTATA S REZULTATIMA JAVNO DOSTUPNOG SERVISA PVGIS

Postoji više javno dostupnih servisa za procjene raspoloživog Sunčevog potencijala za određenu lokaciju i očekivane proizvodnje FN postrojenja koje sadrže informacije o intenzitetu Sunčevog ozračenja, temperaturama okoline, prosječnim dnevnim temperaturama, itd. poput NASA (*surface meteorology and solar energy database*) i Meteonorm database, a u ovom radu korišten je PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) koji je besplatno dostupan putem Interneta. Podaci o intenzitetu sunčeva zračenja na okomitu plohu u navedenim bazama podataka nisu izmjereni, već su izračunati na osnovi satelitskih mjerenja ekstraterestičke radijacije na rubu Zemljine atmosfere [21].

6.1. Opis PVGIS-a

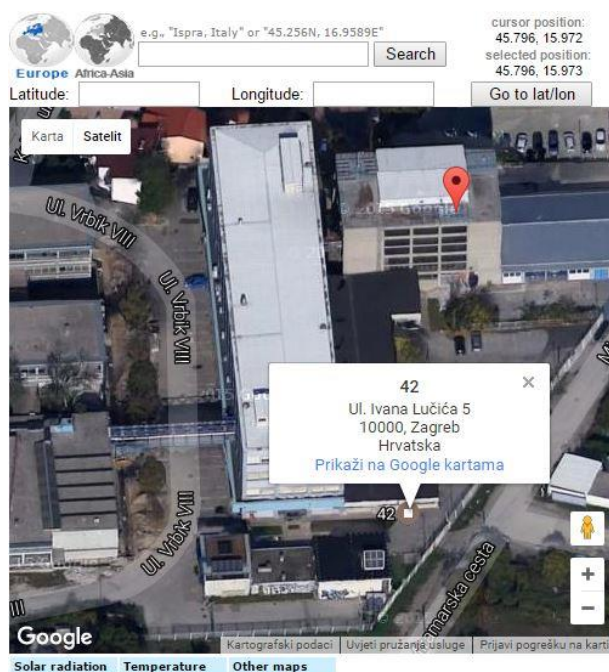
PVGIS pruža popis Sunčevih energetske resursa i procjenu proizvodnje električne energije iz FN sustava temeljen na geografskoj karti u Europi, Africi i jugozapadnoj Aziji. On je dio SOLAREC (Solar Electricity Action) akcije koja doprinosi provedbi obnovljivih izvora energije u Europskoj Uniji kao održivog i dugoročnog izvora energije [23].

Širom Europe postoji nekoliko stotina meteoroloških mjernih stanica gdje se direktno ili indirektno mjeri Sunčevo ozračenje. Obrada satelitskih podataka daje manje pouzdane vrijednosti (u usporedbi s onima mjerenim na tlu), ali prednost je dostupnost podataka za ogromne prostore s vremenskom rezolucijom od 0,5 do 12 sati. Nova generacija satelita i novi modeli obrade pružaju podatke na još većim prostornim i vremenskim rezolucijama (veličina dijela mreže od 1x1 km, svakih 15 minuta) tako da se mogu koristiti energetske vremenske prognoze i FN promatranje velikog stupnja [22].

Ovaj program omogućava mjesečni i godišnji prosjek globalnog ozračenja na horizontalnim i kosim površinama, kao i druge klimatske i FN podatke. (omjer difuznog / globalnog ozračenja i optimalnog kuta nagiba površine). Za odabranu lokaciju, ovi parametri su prikazani u posebnom prozoru kao tablica i skup dijagrama. Moguća je i procjena deficita u godišnjem prosjeku horizontalnog ozračenja zbog malog broja sunčanih dana.

6.2. Analiza rezultata PVGIS-a

Jedan od zadataka je usporedba stvarnih dobivenih podataka svakog FN panela (snage 320W) Sunčane elektrane i teorijski pretpostavljenih podataka, koji su procijenjeni PVGIS-om za lokaciju fakulteta. Cilj je da se na osnovu servisa i eksperimentalno dobivenih rezultata napravi što preciznija procjena moguće proizvodnje.



Slika 68. Geografska lokacija Sunčeve elektrane

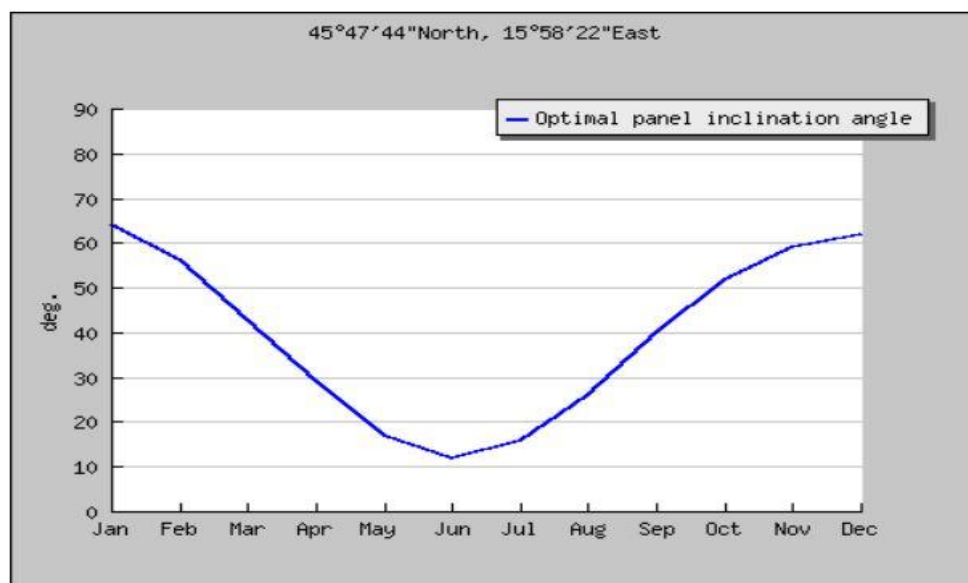
PVGIS servis koristi sljedeće ulazne podatke sustava:

- FN tehnologija: kristalni silicij,
- Instalirana snaga sustava: 0,320 kWp,
- Procijenjeni gubici zbog niske temperature i slabog intenziteta zračenja: 8,0 %,
- Kut nagiba FN panela: 45°.

Procijenjeni gubici nisu izračunati već se pretpostavljaju za navedene FN module.

PV Estimation	Monthly radiation	Daily radiation	Stand-alone PV
Performance of Grid-connected PV Radiation database: Classic PVGIS [What is this?] PV technology: Crystalline silicon Installed peak PV power: 0.32 kWp Estimated system losses [0;100]: 8 % Fixed mounting options: Mounting position: Free-standing Slope [0;90]: 45 ° <input type="checkbox"/> Optimize slope Azimuth [-180;180]: 0 ° <input type="checkbox"/> Also optimize azimuth <small>(Azimuth angle from -180 to 180. East=-90, South=0)</small> Tracking options: <input type="checkbox"/> Vertical axis Slope [0;90]: 0 ° <input type="checkbox"/> Optimize <input type="checkbox"/> Inclined axis Slope [0;90]: 0 ° <input type="checkbox"/> Optimize <input type="checkbox"/> 2-axis tracking Horizon file: Odaberi datoteku Nije odabrana niti jedna datoteka. Output options <input checked="" type="checkbox"/> Show graphs <input type="checkbox"/> Show horizon <input checked="" type="radio"/> Web page <input type="radio"/> Text file <input type="radio"/> PDF <div>Calculate [help]</div>			
Monthly global irradiation data Radiation database: Classic PVGIS <input type="checkbox"/> Horizontal irradiation <input checked="" type="checkbox"/> Irradiation at opt. angle <input type="checkbox"/> Direct normal irradiation <input checked="" type="checkbox"/> Irradiation at chosen angle: 45 deg. <input type="checkbox"/> Linke turbidity <input type="checkbox"/> Dif. / global radiation <input checked="" type="checkbox"/> Optimal inclination angle Monthly ambient temperature data <input type="checkbox"/> Average daytime temperature <input type="checkbox"/> Daily average of temperature <input type="checkbox"/> Number of heating degree days Output options <input checked="" type="checkbox"/> Show graphs <input type="checkbox"/> Show horizon <input checked="" type="radio"/> Web page <input type="radio"/> Text file <input type="radio"/> PDF <div>Calculate [help]</div>			

Slika 69. Ulazni parametri u PVGIS servisu za FN module na fiksnom nosaču



Slika 70. Promjena optimalnog kuta nagiba FN modula na fiksnom nosaču tijekom godine

Za optimalni kut nagiba α_{opt} , PVGIS predlaže 34° . Prema ovom kutu bi tijekom cijele godine trebala biti postignuta optimalna proizvodnja električne energije. Također je prikazano na slici 73 da je najmanji potreban kut nagiba za lipanj, a najveći za siječanj.

PVGIS servis na temelju ulaznih podataka određuje:

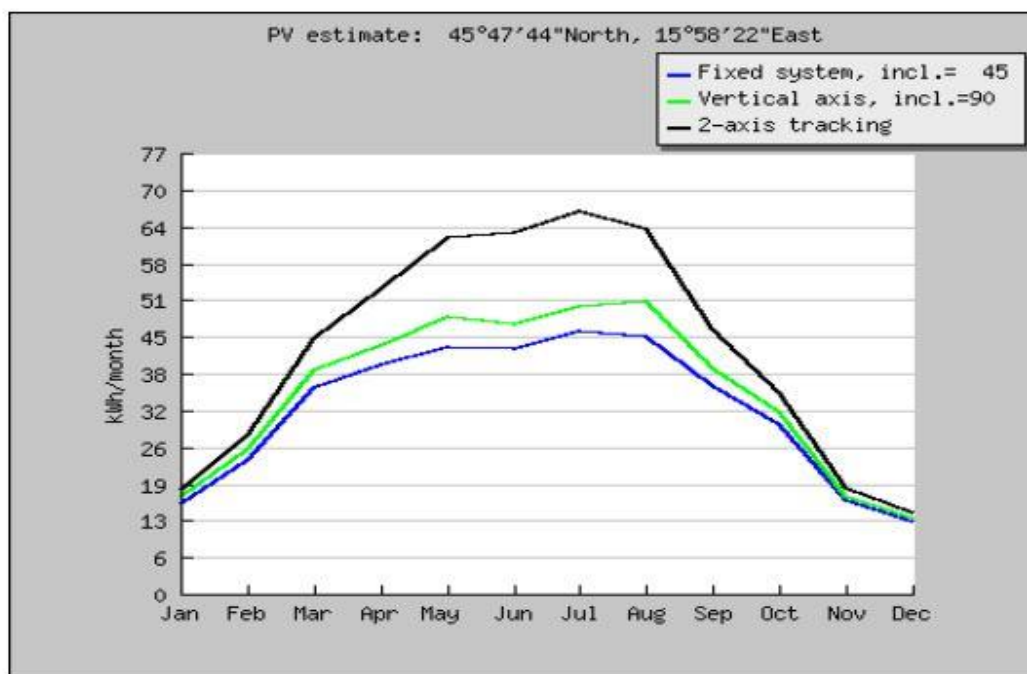
- α_{opt} - optimalni kut nagiba tijekom cijele godine
- α_{optm} - optimalni kut nagiba za svaki mjesec pojedinačno,
- H_{opt34} - prosječno dnevno osunčanje pri optimalnom kutu nagiba od 34°
- H_{45m} - prosječno mjesečno osunčanje pri fiksnom kutu nagiba od 45°
- H_{do_m} - prosječno mjesečno osunčanje za sustav s dvoosnom rotacijom modula
- H_{jo_m} - prosječno mjesečno osunčanje za sustav s jednoosnom rotacijom modula
- E_{opt34m} - prosječnu mjesečnu proizvodnju energije FN modula fiksnog nosača s kutom 34°
- E_{45m} - prosječnu mjesečnu proizvodnju energije FN modula fiksnog nosača s kutom 45°
- E_{dom} - prosječnu mjesečnu proizvodnju za sustav s dvoosnom rotacijom modula
- E_{jom} - prosječnu mjesečnu proizvodnju za sustav s jednoosnom rotacijom modula

<i>Mjeseci</i>	<i>H_{opt34}</i> (Wh/m ² dan)	<i>H_{45m}</i> (kWh/m ²)	<i>H_{jo_m}</i> (kWh/m ²)	<i>H_{do_m}</i> (kWh/m ²)	<i>α_{optm}</i>
Siječanj	1700	56,1	60,7	65,1	63
Veljača	2850	83,7	89,9	99,4	57
Ožujak	4280	135	142	166	45
Travanj	5210	153	161	202	31
Svibanj	5740	169	182	242	18
Lipanj	6040	170	180	248	13
Srpanj	6260	183	194	265	16
Kolovoz	6000	180	197	253	28
Rujan	4690	141	148	178	41
Listopad	3460	111	117	133	53
Studeni	1860	58,9	60,5	66,0	59
Prosinac	1330	44,0	46,3	49,5	63

Tablica 4. Dobiveni podaci osunčanja kod FN panela prema PVGIS-u

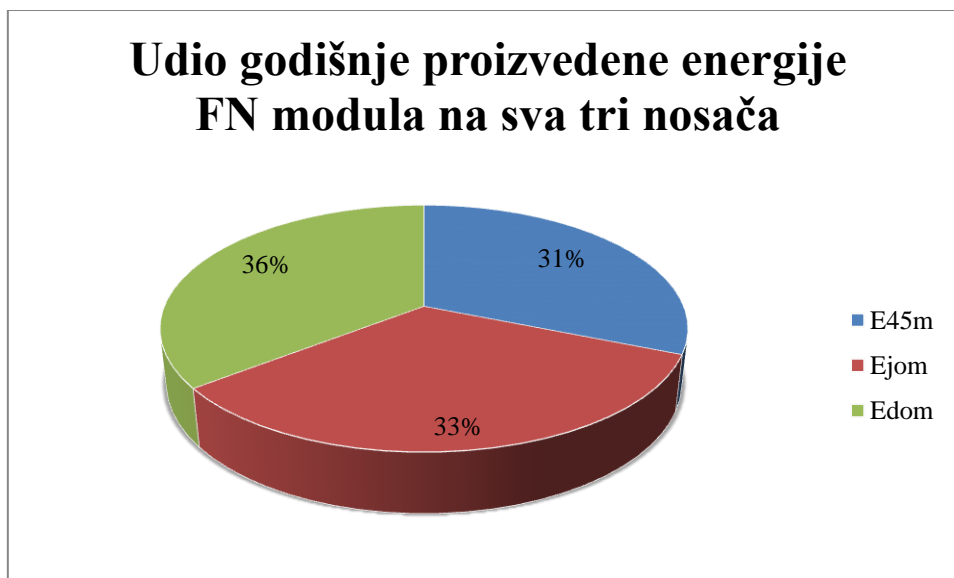
<i>Mjeseci</i>	<i>Eopt34_m</i> (kWh)	<i>E45_m</i> (kWh)	<i>Ejo_m</i> (kWh)	<i>Edo_m</i> (kWh)
Siječanj	14,90	15,80	16,90	18,00
Veljača	22,30	23,30	25,20	27,50
Ožujak	35,60	36,00	39,00	44,60
Travanj	40,80	39,90	43,40	53,00
Svibanj	45,20	42,90	48,20	62,20
Lipanj	45,50	42,60	46,90	63,00
Srpanj	48,40	45,60	50,10	66,80
Kolovoz	46,30	44,80	50,80	63,50
Rujan	36,20	36,30	39,20	46,10
Listopad	28,50	29,50	31,60	35,10
Studeni	15,60	16,40	17,00	28,50
Prosinac	11,80	12,60	13,20	14,10

Tablica 5. Dobiveni podaci proizvedene energije FN panela prema PVGIS-u

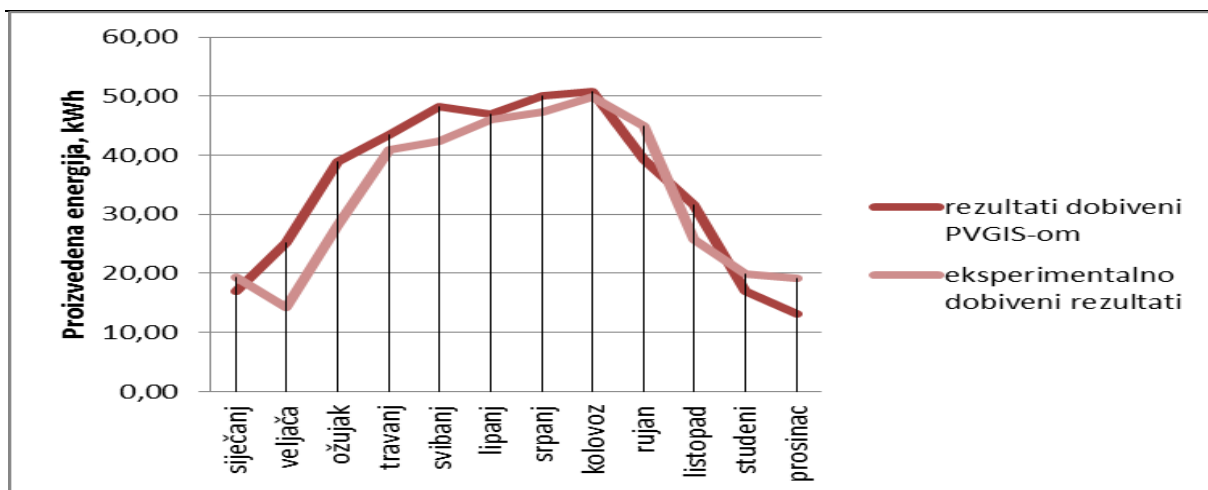


Slika 71. Usporedba mjesečne proizvedene energije FN panela prema PVGIS-u

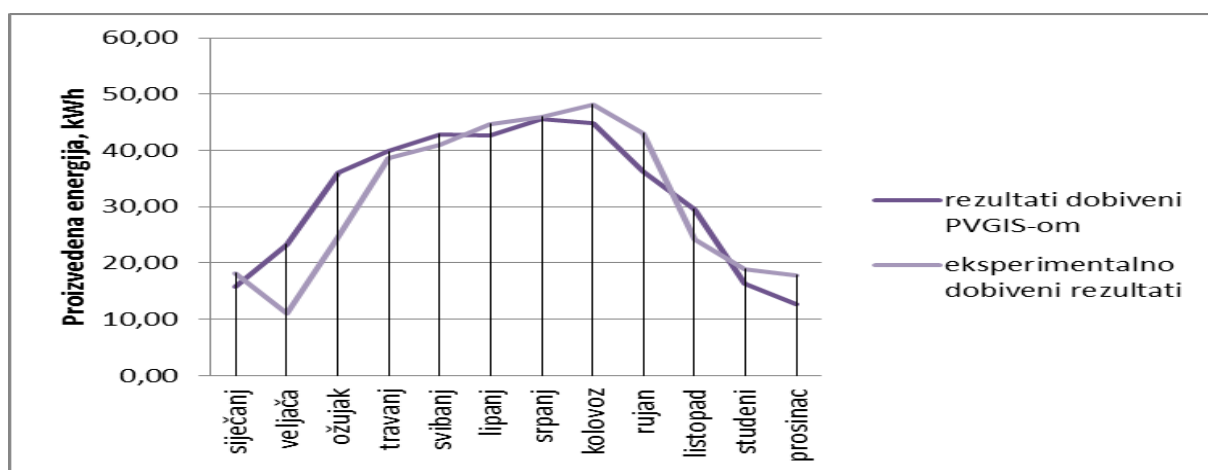
Slika 71 pokazuje tri slučaja: plava krivulja pokazuje očekivanu godišnju proizvodnju energije FN modula na fiksnom nosaču pri optimalnom kutu nagiba $\alpha = 34^\circ$, zelena krivulja pokazuje očekivanu godišnju proizvodnju FN modula na jednoosnom nosaču, a crna krivulja pokazuje očekivanu godišnju proizvodnju sustava sa dvoosnom rotacijom. Očekuje se značajno veće proizvodnje energije FN panela na dvoosnom nosaču, pogotovo u ljetnim mjesecima. Upravo takva očekivanja su i dobivena eksperimentalno prikupljenim podacima, analiziranim u prethodnom poglavlju. Jedina razlika je što se podaci dobiveni PVGIS servisom odstupaju od eksperimentalnih podataka, ali u vrlo maloj mjeri, tako da se može zaključiti da se krivulje rezultata u dijagramu gotovo poklapaju. U oba slučaja je najviše energije proizvedeno u ljetnim mjesecima, a najmanje u zimskim. Najveće odstupanje se može uočiti u veljači kada je Sunčana elektrana proizvela najmanje energije, a razlog tome je nepredviđeno jako loše vrijeme toga mjeseca. Također je zanimljivo što PVGIS predviđa najveću proizvodnju u sedmom mjesecu, dok je u stvarnosti to bio slučaj s kolovozom. Takvo odstupanje opet nije u velikoj mjeri, pa se može pripisati različitim utjecajima kao što su to hlađenje FN modula vjetrom i slično. Najrazličitije krivulje su u dijagramu za dvoosni nosač zato što je takav FN sustav najteži za procijeniti, odnosno najkompliciraniji je sustav za praćenje Sunčevog kretanja.



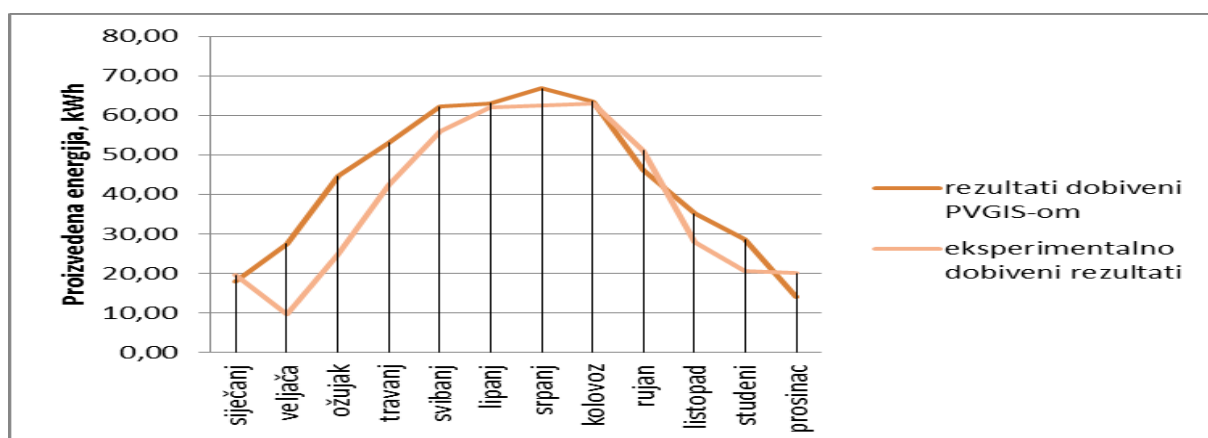
Slika 72. Udio godišnje proizvedene energije FN modula na fiksnom, jednoosnom i dvoosnom nosaču



Slika 73. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na jednoosnom nosaču



Slika 74. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na fiksnom nosaču



Slika 75. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i PVGIS-om FN modula na dvoosnom nosaču

7. ZAKLJUČAK

Proizvodnja električne energije iz energije Sunca uvelike je prisutna u Europskoj uniji, pa tako i u Hrvatskoj. Potaknuto brojnim istraživanjima o globalnom zatopljenju stručnjaka za klimatske promjene, ovaj rad se temelji na analizi proizvedene energije instalirane Sunčane elektrane. Dan je detaljni tehnički opis Sunčane elektrane od 960W, koja se nalazi na krovu Laboratorija za energetska postrojenja FSB-a. Elektrana se sastoji od šest FN modula identičnih značajki koji čine tri FN panela snage, po dva na svakom nosaču ukupne snage 320 W. Sva tri FN panela nalaze se na različitim sustavima za praćenje pravca ozračenja Sunca. Napravljena je detaljna usporedba proizvedene energije navedenih FN modula na godišnjoj, mjesečnoj i tjednoj razini, kako bi mogli biti doneseni sigurni zaključci o učinkovitosti svakog sustava. Svi eksperimentalni podaci pohranjeni su na web sučelju na kojemu mogu biti prikazani na razne načine. Na kraju rada, ti podaci uspoređeni su s rezultatima dobivenim preko javno dostupnog servisa izračuna PVGIS.

Hrvatska ima izuzetan potencijal za proizvodnju električne energije iz FN sustava. Iz rezultata PVGIS-a za procjenu proizvodnje električne energije i Sunčevih energetskih resursa, možemo vidjeti da taj potencijal nije ograničen samo na južni, obalni dio, već je dosta značajan u svim dijelovima zemlje, pa tako i u Zagrebu. Dobiveni optimalni kut nagiba tijekom cijele godine FN modula je 34° , dok je proučavani FN panel postavljen na 45° .

Sunčana je elektrana u razdoblju od jedne godine proizvela sveukupno 1,24 MWh energije, od koje su FN moduli na fiksnom nosaču proizveli 378 kWh, oni na jednoosnom 401 kWh, a na dvoosnom 462 kWh. Iz rezultata je vidljivo da najveći udio u proizvodnji imaju FN moduli sa dvoosnom rotacijom od 42 %, dok najmanji imaju fiksni moduli od 28 %. Razlike u proizvodnji između dva modula na istom nosaču pokazale su se zanemarivo malima, kao što je to bilo i očekivano u početku. Naime, razlika u pridonesenoj energiji između jednoosnog sustava i fiksnog sustava na godišnjoj razini, nije značajna i iznosi svega 7 %, dok je razlika između najproduktivnijeg dvoosnog i najneproduktivnijeg fiksnog već poprilično velika i iznosi 33 %.

Procjenom preko PVGIS servisa, dobiveni su udjeli koji za FN module na fiksnom nosaču iznose 31 %, na jednoosnom 33 % te na dvoosnom najvećih 36 %. Rezultati mjerenja provedenih na Sunčanoj elektrani pokazuju visoki stupanj podudarnosti s modeliranim podacima pomoću PVGIS-a, tako da se ovaj servis svakako može koristiti kao vrlo pouzdan alat za procjenu proizvodnje energije budućih FN elektrana na bilo kojoj lokaciji u Hrvatskoj.

LITERATURA

- [1] Ankica Đukić, Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskoga modula, Doktorska disertacija, 2013.
- [2] http://www.windows2universe.org/sun/spectrum/multispectral_sun_overview.html- dostupno 4.1.2017.
- [3] <http://www.grida.no/>- dostupno 4.1.2017.
- [4] <http://www.izvorienergije.com/energija.html>- dostupno 4.1.2017.
- [5] <http://www.zavod.pgz.hr/>- dostupno 6.1.2017.
- [6] http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_r.html- dostupno 6.1.2017.
- [7] <http://www.oikon.hr/>- dostupno 10.1.2017.
- [8] <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/solar/>- dostupno 16.1.2017.
- [9] <https://meteotest.ch/>- dostupno 16.1.2017.
- [10] <http://www.mgipu.hr/default.aspx?id=14888> - dostupno 16.1.2017.
- [11] http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/EurObservER_barojdpv13-Photovoltaic-Barometer-2015-EN.pdf - dostupno 20.1.2017.
- [12] <http://www.energetska-efikasnost.me/>- dostupno 20.1.2017.
- [13] <http://www.obnovljivi.com/energija-sunca/52-znacaj-i-vizija-energije-sunca-u-buducnosti?start=3>- dostupno 20.1.2017.
- [14]...http://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/GI_2015_HROTE_OIEiK_2015_za_WEB_v3.pdf
- [15] <http://solargis.info/imaps/>- dostupno 2.2.2017.
- [16] <https://oie-aplikacije.mingo.hr/pregledi/PopupIzvestaj.aspx?ReportId=17ed7352-2f8d-416b-b2fb-cec912e96428>- dostupno 2.2.2017.
- [17] <http://soltech.hr/>- dostupno 3.2.2017.
- [18] <http://www.zelenaenergija.org/clanak/solarne-fotonaponske-celije-fotocelije/429>- dostupno 4.2.2017.
- [19] <https://www.nrel.gov/pv/>- dostupno 4.2.2017.
- [20] http://www.bazgin.hr/solarna_oprema.html- dostupno 3.2.2017.
- [21] Cvrk, I.: Optimiranje korištenja solarne energije fotonaponskom pretvorbom, diplomski rad, FER, Zagreb, 2011.
- [22] <http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>- dostupno 3.2.2017.

-
- [23] Maksumic, A.: Usporedna tehno-ekonomska analiza različitih izvedbi fotonaponskih elektrana, završni rad, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2016.
- [24] Nodilo, K.: Usporedba mjerenja i procjene za fotonaponske primjene, završni rad, FER, Zagreb, 2010.
- [25] Božo Udovičić.: Energetika, Školska knjiga, Zagreb 1993.
- [26] oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf- dostupno 3.2.2017.
- [27] <http://zadar.travel/hr/vodic/atrakcije/05-12-2007/pozdrav-suncu#.WLdjljs1-M8> – dostupno 4.2.2017.
- [28] <http://e-learning.gornjogradska.eu/energijaekologijaengleski-ucenici/2-energija-sunca-i-fotonaponske-celije/> - dostupno 4.2.2017.
- [29] <http://www.hsuse.hr/> - dostupno 4.2.2017.